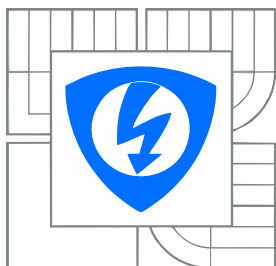


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## STUDIE SROVNÁNÍ VLASTNOSTÍ POUZDER QFN A BGA

STUDY OF BGA AND QFN PACKAGE PROPERTIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. JOSEF SKÁCEL

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.

BRNO 2015

## **ABSTRAKT**

Předkládaná práce se zabývá problematikou pouzdření a přestupem tepla v moderní mikroelektronice. Především je práce zaměřena na pouzdra QFN a BGA, v dnešní době nejsofistikovanější běžné řešení. První část práce se zabývá rozbořem současného stavu pouzder. Další částí je rozbor problematiky přenosu tepla v elektronických systémech. Následující část je experimentální, zabývající se simulací v programu ANSYS Workbench a potvrzením těchto simulací navrženou testovací strukturou. V závěru jsou zhodnoceny zjištěné vlastnosti a chování těchto pouzder.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Pouzďření v elektronice, ANSYS Workbench, teplotní simulace, pouzdřicí materiály, termomechanické pnutí, TKR

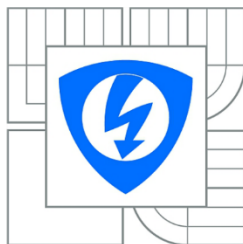
## **ABSTRACT**

This work deals with the issue of packaging and heat transfer in modern microelectronics. Especially this work focuses on QFN and BGA packages, the most sophisticated conventional solution nowadays. First part is dedicated to the analysis of the current status of packages. Next part dedicated to the analysis the issue of heat transfer in electronic systems. The following section is an experimental dealing with simulation in ANSYS Workbench and validation of these simulations by designed test structures. At the end are evaluated properties and behavior of these packages.

## **KEYWORDS**

Packaging in electronics, ANSYS Workbench, thermal simulation, packaging materials, thermo-mechanical tension, CTE

SKÁCEL, J. *Studie srovnání vlastností pouzder QFN a BGA*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2015. 55 s., Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav mikroelektroniky**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

**Mikroelektronika**

**Student:** Bc. Josef Skácel

**ID:** 140418

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Studie srovnání vlastností pouzder QFN a BGA**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši v oblasti teplotního chování pouzder QFN a BGA. Zvolte dostupný typ obvodu v pouzdrech QFN a BGA a navrhnete testovací strukturu pro zkoumání teplotních vlastností. Přitom využijte pro simulaci program ANSYS.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Szendiuch, I.: Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů, VUT IUM, 2006

**Termín zadání:** 10.2.2015

**Termín odevzdání:** 28.5.2015

**Vedoucí práce:** doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

**Konzultanti diplomové práce:**

**prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Studie srovnání vlastností pouzder QFN a BGA jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. Za jeho přístup, účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Boleslavu Psotovi za cenné rady a usnadnění řešení problematiky simulací v programu ANSYS. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Alexandru Otáhalovi za pomoc při praktické realizaci a za cenné rady. V neposlední řadě bych rád poděkoval i panu Ing. Marianu Brázdilovi za pomoc s měřením. Dále bych také rád poděkoval panu Ing. Pavlu Říhákovi a panu Ing. Radku Valovi za pomoc s RTG měřením a cenné rady. A především firmě SANMINA za možnost měření a firmě Gatema za zhotovení testovacích vzorků. Nakonec bych velmi rád poděkoval rodině za podporu při studiu a všem, kteří mě podporovali po celou dobu studia.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)



Autor děkuje za zapůjčení vybavení z projektu ED0002/01/01 - NETME CENTRE a NETME CENTRE PLUS - Projekt LO1202, získaného za finanční podpory MŠMT v rámci programu NPU I.

# OBSAH

Úvod	11
<b>1 Popis současného stavu pouzder</b>	<b>12</b>
1.1 Materiály pro pouzdření.....	13
1.1.1 Kovová a keramická pouzdra .....	13
1.1.2 Plastová pouzdra.....	14
1.1.3 Materiály používané pro plastová pouzdra.....	14
1.2 Adhezivní materiály v elektronice.....	18
1.3 Problematika underfilu .....	24
1.4 Výběr pouzdřicího materiálu.....	26
<b>2 Porovnání pouzder QFN a BGA</b>	<b>27</b>
2.1 Pouzdro QFN.....	27
2.2 Pouzdro BGA .....	29
2.3 QFN versus BGA.....	30
2.4 Zjišťování vlastností pouzder .....	31
<b>3 Tepelné chování pouzder</b>	<b>33</b>
3.1 Přenos tepla.....	33
3.1.1 Přenos tepla vedením .....	33
3.1.2 Přenos tepla prouděním.....	33
3.1.3 Přenos tepla zářením.....	34
3.2 Teplota skelného přechodu.....	34
3.3 Náhradní tepelný obvod.....	35
3.4 Termomechanické pnutí.....	36
<b>4 Experimentální část</b>	<b>39</b>
4.1 Simulace vlastností pouzder .....	39
4.2 Simulace pouzdra QFN a BGA.....	40
4.3 Návrh testovací struktury .....	45
4.4 Měření termovizní kamerou .....	46

4.5	Vyhodnocení výsledků .....	49
5	Závěr	51
	Literatura	52



Obr. 1: Vývojová mapa pouzder (podle [4]) .....	12
Obr. 2: Zesítení základních typů polymerů [8].....	14
Obr. 3: Zesítení termosetového polymeru [9] .....	15
Obr. 4: Polymerní vazba polyetylenu.(termoplast) [9].....	16
Obr. 5: Struktura hermetického LCP nanomateriálu (Podle [10]) .....	17
Obr. 6: Oblasti použití adhezivních materiálů [13] .....	18
Obr. 7: Graf vytvrzení v závislosti na teplotě [9] .....	19
Obr. 8: Princip nastavení teplotního toku adhesivního materiálu [9] .....	19
Obr. 9: Princip funkce viskozimetru [9] .....	20
Obr. 10: Závislost smykové rychlosti na smykovém napětí [9] .....	21
Obr. 11: Diferenční kompenzační kalorimetr [14] .....	21
Obr. 12: Chemické reakce při diferenční kompenzační kalorimetrii [9] .....	22
Obr. 13: Závislost tepelného toku na době vytvrzení [9] .....	22
Obr. 14: Graf teplotní degradace materiálu [9].....	23
Obr. 15: Základní metody nanášení underfilu.....	24
Obr. 16: Čas nutný k zaplnění kapilár [15].....	25
Obr. 17: Pouzdra QFN vyrobené metodou Saw, Punch .....	27
Obr. 18: a) Klasické pouzdro, b) QFN aQFN-MR (podle [22], [23]).....	28
Obr. 19: Technologické možnosti pouzdra QFN .....	28
Obr. 20: Pouzdro BGA a řez pouzdem BGA [26], [27] .....	30
Obr. 21: Řez pouzdem DSBGA.....	30
Obr. 22: a) Útlum signálu v QFP x QFN; b) Tepelný odpor TFBGA x QFN; c) RLC hodnoty různých pouzder (podle [28], [29]) .....	31
Obr. 23: Teplota skelného přechodu [podle 33].....	35
Obr. 24: Zobrazení tepelného modelu QFN pouzdra .....	36
Obr. 25: Termomechanické pnutí v pouzdře BGA [35].....	37
Obr. 26: Defekty způsobené termomechanickým pnutím [36] .....	38
Obr. 27: Mikro výbrus pouzder QFN a BGA [37], [38].....	38
Obr. 28: Metoda konečných prvků / mesh .....	39
Obr. 29: Modely pouzder QFN a BGA.....	40

Obr. 30: Tepelný tok v pouzdře QFN .....	41
Obr. 31: Tepelný tok v pouzdře BGA .....	41
Obr. 32: Rozložení teploty na pouzdře QFN .....	42
Obr. 33: Rozložení teploty na pouzdře BGA .....	42
Obr. 34: Zobrazení deformace pouzdra QFN v závislosti na teplotě (22 °C) .....	43
Obr. 35: Zobrazení deformace pouzdra QFN v závislosti na teplotě (48 °C) .....	43
Obr. 36: Zobrazení deformace pouzdra BGA v závislosti na teplotě (22 °C) .....	44
Obr. 37: Zobrazení deformace pouzdra BGA v závislosti na teplotě (72°C) .....	44
Obr. 38: Zapojení pouzdra BGA a QFN.....	45
Obr. 39: Měřicí pracoviště / detail na testovací vzorky BGA a QFN .....	46
Obr. 40: Rozložení teplot na pouzdře QFN (nezatíženo / zatíženo) .....	47
Obr. 41: Rozložení teplot na pouzdře BGA (nezatíženo / zatíženo).....	47
Obr. 42: RTG inspekce pouzdra QFN hot plate / exsikátor .....	48

# ÚVOD

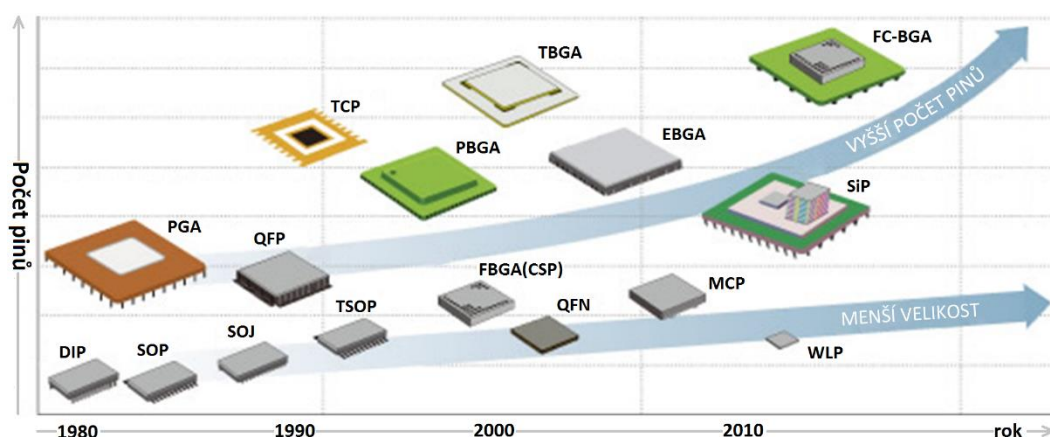
Z důvodu rychlého technického rozvoje a miniaturizace jsou potřeba menší, ale výkonnější systémy. Tento požadavek způsobuje zvýšení hustoty prvků na substrát. Pro tyto potřeby vznikají vhodnější pouzdra, metody pouzdření a používají se nové materiály. Elektronické systémy jsou v dnešní době všudy přítomné a nacházejí se ve všech průmyslových odvětvích. Tato odvětví určují jejich kvalitu, spolehlivost a cenu. Proto se používají různé pouzdríci materiály a typy pouzder. Například mnoho let používané pouzdra DIL (Dual In-line) s vývody na dvou protilehlých stranách, QFP (Quad Flat Package) součástka s vývody po všech čtyřech stranách. Ve složitějších systémech se používají bez vývodové součástky pro jejich menší rozměry a vyšší spolehlivost. Nástupcem QFP je novější pouzdro QFN (Quad Flat No-leads) a BGA (Ball Grid Array). Obě tyto pouzdra jsou bez vývodové. Používá se i tzv. pouzdra CSP (Chip-scale Package) nebo Flip Chip.

Zvyšující se hustota prvků na čipu byla znázorněna tzv. Moorovým zákonem, který je pojmenován po Gordonu Moorovi, jednom ze zakladatelů firmy Intel. Znění by se dalo parafrázovat jako: Počet tranzistorů, které mohou být umístěny na integrovaný obvod, se při zachování stejné ceny zhruba každých 18 měsíců zdvojnásobí. Tento zákon více méně platí, ale technologicky, tedy spíše fyzikálně již nebude možné tento zákon splnit. Při technologickém procesu 16 nm se dostáváme na fyzikální možnosti materiálu. Vývojová mapa Intelu ukazuje předpokládaný nástup 5 nm technologie v roce 2020. S dosavadními materiály a technologickými procesy to není možné, proto musí nastoupit nové materiály jako například grafen nebo hliníkové nanotrubic. Pro porovnání, první generace socketu procesoru obsahovala 169 pinů, standardní procesory obsahovaly přibližně jeden milion tranzistorů a měly pracovní frekvenci až 150 MHz. V dnešní době používaný socket 2011 obsahuje 2011 pinů, standardní procesory obsahují 1,4 miliardy tranzistorů nazvaných Tri-gate a mají takt 3,6 GHz na šesti jádrech. Z toho vyplývá další problematika a tím je zvyšující tepelný výkon těchto součástek, kdy nastává problematika různých hodnot teplotních roztažností použitých materiálů. Právě z výše uvedených důvodů se jeví návrh pouzdra v elektronických systémech jako ta nejdůležitější část [1][2][3].

# 1 POPIS SOUČASNÉHO STAVU POUZDER

Pouzdrění nebo zalévání součástky či elektronického systému se používá ke zlepšení mechanické odolnosti, přenosu tepla, vedení signálu a celkové izolace systému před okolními vlivy. Na první pohled se návrh pouzdra nejeví jako důležitá část při návrhu součástky. V minulosti se na tuto problematiku právě tímto způsobem nahlíželo, ale opak je pravdou, způsob pouzdrění elektronických systému je základním a strategickým krokem při integraci elektronických obvodů. Návrh pouzdra rozhoduje o jakosti, parametrech, funkci, spolehlivosti a především o velikosti a ceně.

Jako první rozšířená pouzdra pro integrované obvody by se dala považovat pouzdra s označením DIP (Dual in-line package) tedy pouzdra se dvěma řadami vývodů, která navrhla firma Fairchild R&D v roce 1964 a byla vyrobena z materiálu na bázi epoxidové pryskyřice. Od této doby šel vývoj velmi dopředu, jak lze vidět na obr. 1. Pouzdra se ubírají dvěma směry a to do menší velikosti a vyššího počtu vývodů. Z důvodu čím dál větších nároků na integraci je dnešním trendem vytvářet 3D struktury uvnitř pouzdra a tzv. embedded systémy tedy způsob vnoření součástky přímo do substrátu. Obr. 1 popisuje jen základní a nejrozšířenější pouzdra. Ve skutečnosti je pouzder velké množství pokrývajících potřeby trhu, a jejich možné rozdělení je podle různých parametrů. Od výkonového zatížení, použitý materiál až po třídy použití. Z průzkumu trhu lze usuzovat směr pouzdrění a to jsou 3D struktury, CSP (Chip scale packages), flip chip a bare chip. Velký rozkvět mají pouzdra pro MEMS (Mikro elektro mechanické systémy) a MOEMS (Mikro opticko-elektronické mechanické systémy) aplikace. Kdy je nutné zapouzdřit tyto celé systémy a neporušit jejich funkci.



Obr. 1: Vývojová mapa pouzder (podle [4])

Mezi hlavní požadavky pouzdrění lze zahrnout následující body [5]:

1. Elektrické připojení součástí
2. Zajištění odvodu tepla
3. Ochrana proti mechanickým vlivům
4. Ochrana proti chemickým a klimatickým vlivům
5. Splnění požadavků na spolehlivost a cenu
6. Jednoduchá manipulace při montáži

Základní rozdělení pouzder je podle přístupu vzduchu a podle typu materiálu. Jsou tři základní používané materiály: kovová, keramická a plastová pouzdra. Podle přístupu vzduchu se pouzdra dělí na: hermetická (vzduchotěsná), nehermetická (s přístupem vzduchu) a polo-hermetická (částečně hermetická).

## 1.1 Materiály pro pouzdrění

### 1.1.1 Kovová a keramická pouzdra

Kovová pouzdra se používají spíše pro náročnější aplikace tedy pro vojenské nebo lékařské účely. Je to z toho důvodu, že představují dokonalou ochranu proti vniknutí vlhkosti, plynů a také velmi dobré elektromagnetické stínění. Jsou hermeticky uzavřená. Kovy jsou poměrně levné materiály, ale jejich zpracování je hlavní položka vyšší finanční zátěže při výrobě pouzdra. Nejčastěji používaným materiálem je kovár. Jeho hodnota teplotní roztažnosti je podobná jako teplotní roztažnosti těsnících skel, ale jeho nevýhodou je neschopnost odvádět teplo. Proto se používají slitiny mědi, které mají naopak velmi dobré vlastnosti pro odvádění tepla, ale jeho rozdílné hodnoty teplotní roztažnosti jsou problematické pro utěsnění víčka s pomocí těsnícího skla [6].

Keramika je stále používaný materiál pro hermetická, ale i pro nehermetická pouzdra, která vyžadují dobrou rovinnost, hladkost povrchu, extrémní mechanickou stabilitu, vysokou tepelnou vodivost a teplotní stabilitu. Keramické materiály a odpovídající procesy při výrobě jsou stále dražší, nežli organické technologie, i když je snaha snížit výrobní náklady spojené s procesem výroby keramických pouzder. Keramika se používá pro vysokofrekvenční zařízení. Pokud to elektronický systém kde je pouzdro použito dovoluje, je nahrazeno polymerním pouzdem. Je to z důvodu jednodušších výrobních procesů a především levnější výroby. Nejčastějším materiálem je oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 90% až 99%, zbytek tvoří oxid křemičitý, hořčnatý nebo vápenatý [6][7].

### 1.1.2 Plastová pouzdra

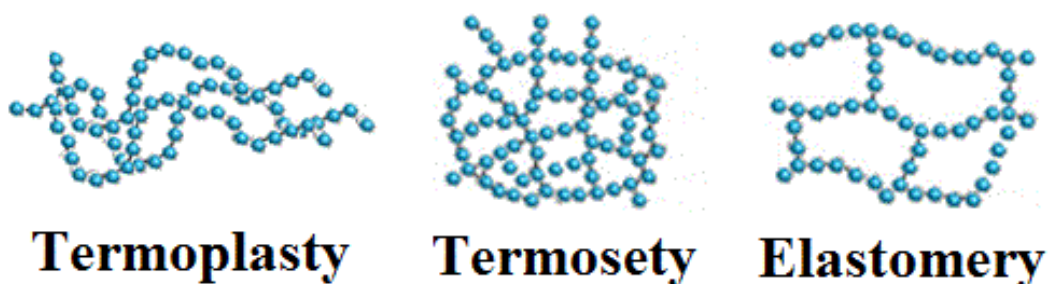
Plastová pouzdra tvoří 95% světového trhu s pouzdry. Především pouzdra na bázi termosetových (reaktoplastových) materiálů. Je to z důvodu zjednodušení technologických procesů k vytvoření pouzdra a především nižší ceny, která činí 10% – 50% ceny kovového nebo keramického pouzdra. Velkou část trhu tvoří spotřební elektronika, kde není kladen tak velký důraz na kvalitu spotřebiče, ale na cenu. Pro výrobce je tak výhodnější volbou pouzdro plastové. Mezi nevýhody tohoto materiálu patří problematika skladování, které je omezené z důvodu stárnutí. Pro vyšší výdrž se musí udržovat materiál v chladu. Po vytvrzení termosetů není možné materiál znovu roztavit a použít [6].

Plastová pouzdra se vyrábí těmito technologickými postupy:

- Zalévání
- Lisování
- Fluidizace
- Zakapávání
- Máčení

### 1.1.3 Materiály používané pro plastová pouzdra

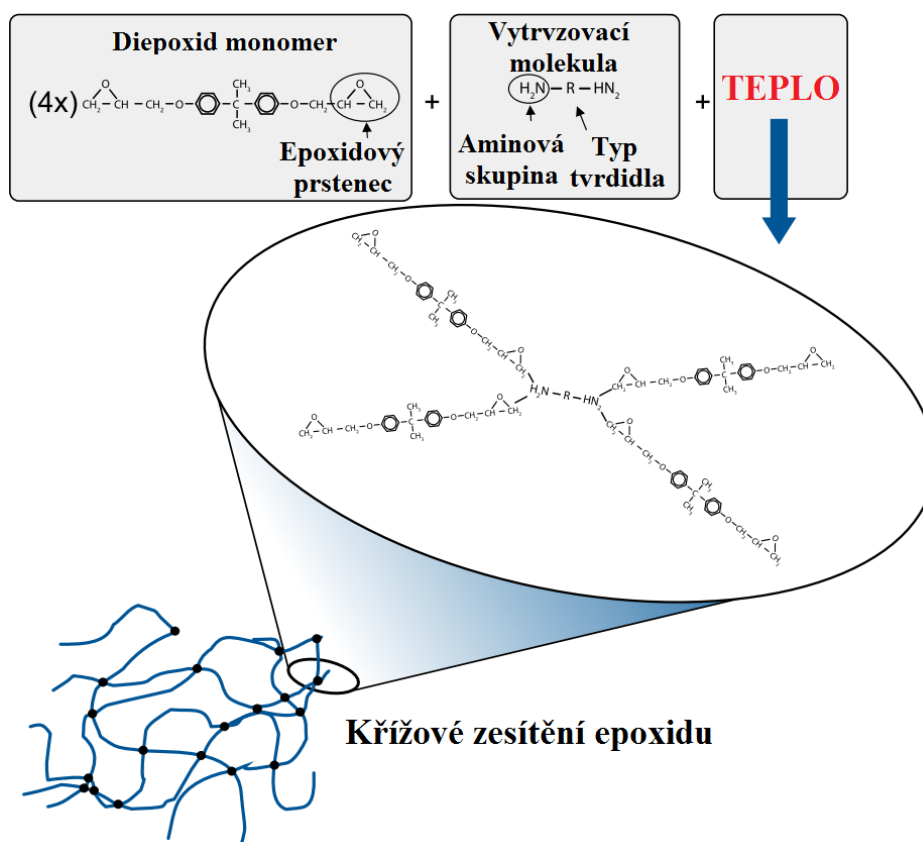
Plasty se vyznačují polymerní vazbou. Původ tohoto slova sahá až do Řecka. Poly (znamená mnoho) a meros (znamená část), tedy mnoho částí. Polymery jsou dlouhé molekulové řetězce složené s mnoha tisíci malých částí (monomerů). Jsou tři základní typy a těmi jsou termoplasty, termosety a elastomery. Na obr. 2 je vyobrazen princip těchto materiálů přesněji jejich zesítnění po vytvrzení. Lze vidět, že termoplasty mají spíše řetězové zesítnění a je tedy možné je opakovaně tvarovat (za pomoci tepla). Termosety mají viditelné křížové zesítnění a jejich monomerizace není možná. Poslední skupinou jsou elastomery, které mají velmi volné zesítnění, z čehož vyplývá jejich vlastnost a to je elasticita.



Obr. 2: Zesítnění základních typů polymerů [8]

### a) Termosety

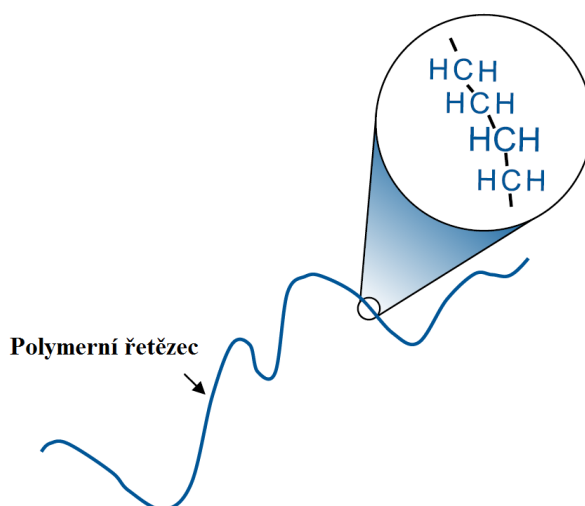
Termosety jsou plasty na bázi epoxidové pryskyřice, vytvořené reakcí monomerů za vzniku dlouhých křížových řetězců lineárních řad vzájemně spojených atomů tzv. makromolekul viz obr. 2. Lze vidět, že je zde mnohem silnější vazba nežli u termoplastů a elastomerů. Na obr. 3 je vyobrazen způsob vazeb, kdy je základem diepoxid monomeru, který má na každém konci epoxidový prstenec. Na tento prstenec se naváže vytvrzovací molekula aminové skupiny. Tato aminová skupina má na každém konci dvě možné vazby a výsledkem je chemická vazba monomeru a vytvrzovadla, tedy polymerní křížová vazba. V závislosti na použitém typu vytvrzovadla, spíše kolik volných vazeb má k dispozici, se určí jeho chemická, elektrická a tepelná odolnost a také odolnost proti vlhkosti. Čím více vazeb tím vyšší odolnost. Termosety jsou vytvrzovány teplem, tlakem a katalyzátory. Epoxidy jsou jedním z nejpoužívanějších materiálů v elektrotechnice (lepidla, substráty, underfil). Z důvodu splnění technologických potřeb jako jsou absorpce vlhkosti a hořlavost je nutné používat sloučeniny bromu a z toho vyplývá nevýhoda toxicity. Ve spojení s dnešními trendy „zelených materiálů“ se nejspíše bude od použití epoxidové pryskyřice ustupovat [7][9].



Obr. 3: Zesíťení termosetového polymeru [9]

## b) Termoplasty

Termoplasty jsou materiály, které je možné opakovaně zpracovávat. Vychází to z principu zesítnění monomerů do polymerního řetězce. Na obr. 4 lze vidět nejjednodušší uhlovodíkový termoplastický polymer a to je lineární polyetylén.



Obr. 4: Polymerní vazba polyetylénu.(termoplast) [9]

V tab. 1 lze vidět nejpoužívanější materiály pro pouzdrění, které vydrží bezolovnaté pájení: LCP (Liquid Crystal Polymer), PEEK (Polyetherketon), PPA (Polyphthalamid), PPS (Polyfenylsulfid) [7].

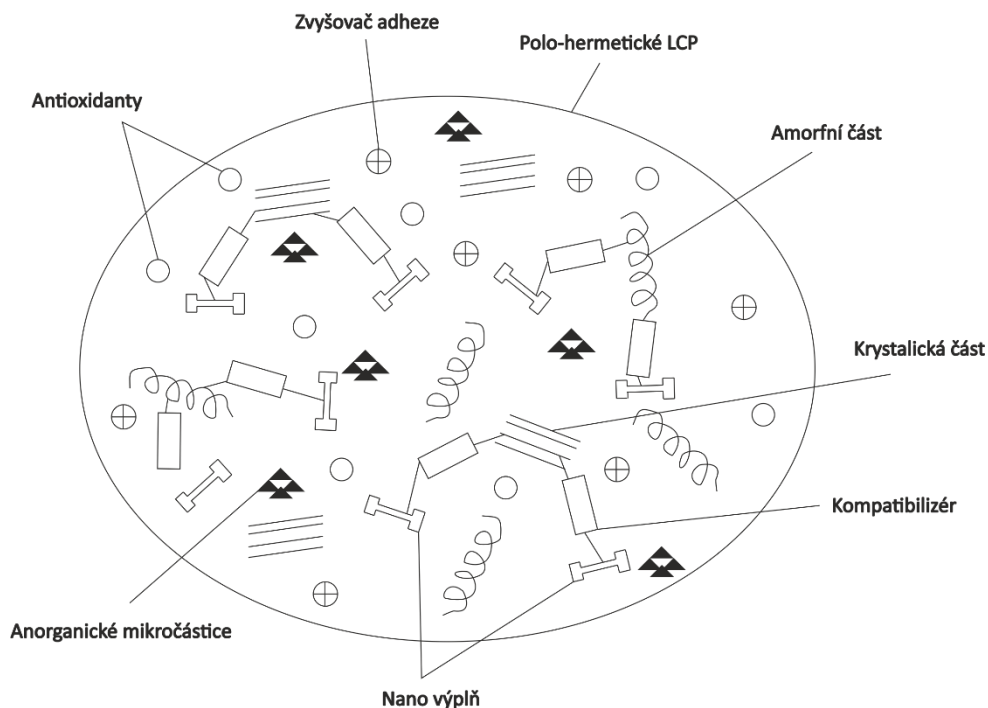
Tab. 1: Nejpoužívanější termoplasty

Plasty	Absorpce vody	Bod tání	CTE
LCP	0,02 - 0,10	280 - 352	0 - 12
PEEK	0,15	340	16
PPA	0,15 - 0,29	310 - 332	22 - 40
PPS	0,01 - 0,04	280	19 - 27

První z nich, LCP (aramid), je ze skupiny uvedených nejvíce perspektivní a to z důvodu velmi dobrých elektrických i mechanických vlastností. Má nízký koeficient teplotní roztažnosti. Podle přidávaných látek lze rozdělit LCP pouzdra na polo- hermetická a plně hermetická. Plně hermetická pouzdra jsou keramická nebo kovová, ale v porovnání s LCP je největším rozdílem cena, která je u srovnatelného keramického pouzdra přibližně o 60% vyšší nežli u LCP. Samotný LCP materiál je částečně hermetický, ale s přidavkem nanovýplně se stává plně hermetickým [10].



Jako nanovýplně se používají: wollastonite (na bázi kalcia a křemíku), kaolín (na bázi křemíku), talcum (na bázi hořčíku) a mica (na bázi křemíkových minerálů). Na obr. 5 je vyobrazeno složení plně hermetického materiálu na bázi LCP. Do klasického materiálu se přidávají nanovýplně, které se dostanou mezi molekulární části místo amorfni části a části krystalické. Těmito vazbami se docílí hermetičnosti. Odvětví, ve kterém budí použití LCP materiálu velký zájem jsou MEMS a MOEMS, kdy je vyrobeno QFN pouzdro s kavitou uvnitř kvůli funkci mikro-elektromechanických systémů [10].



Obr. 5: Struktura hermetického LCP nanomateriálu (Podle [10])

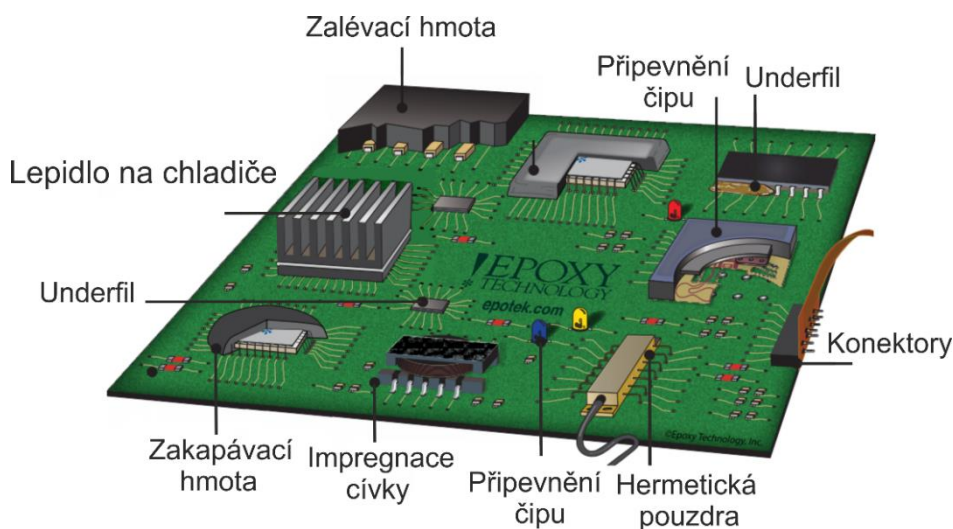
### c) Elastomery

Elastomery jsou materiály na bázi silikonu. Vyznačují se velmi nízkou hodnotou skelného přechodu ( $T_g$ ). Tato vlastnost umožňuje zachovat pružnost směsi v širokém teplotním rozsahu a navíc nedochází k degradaci. Tento materiál se používá například při pouzdření LED diod, kde napomáhá odvádět tepelný výkon. Nevýhodou je obsah vlhkosti při zpracování. Především termoplastických elastomerů, tedy těch, které se chovají při pokojové teplotě jako elastomery, ale zpracovávají se jako termoplasty. Defekty vznikají již při obsahu 0,2% – 0,3% obsahu. Před zpracováním se musí vždy vysoušet [6][11].

## 1.2 Adhezivní materiály v elektronice

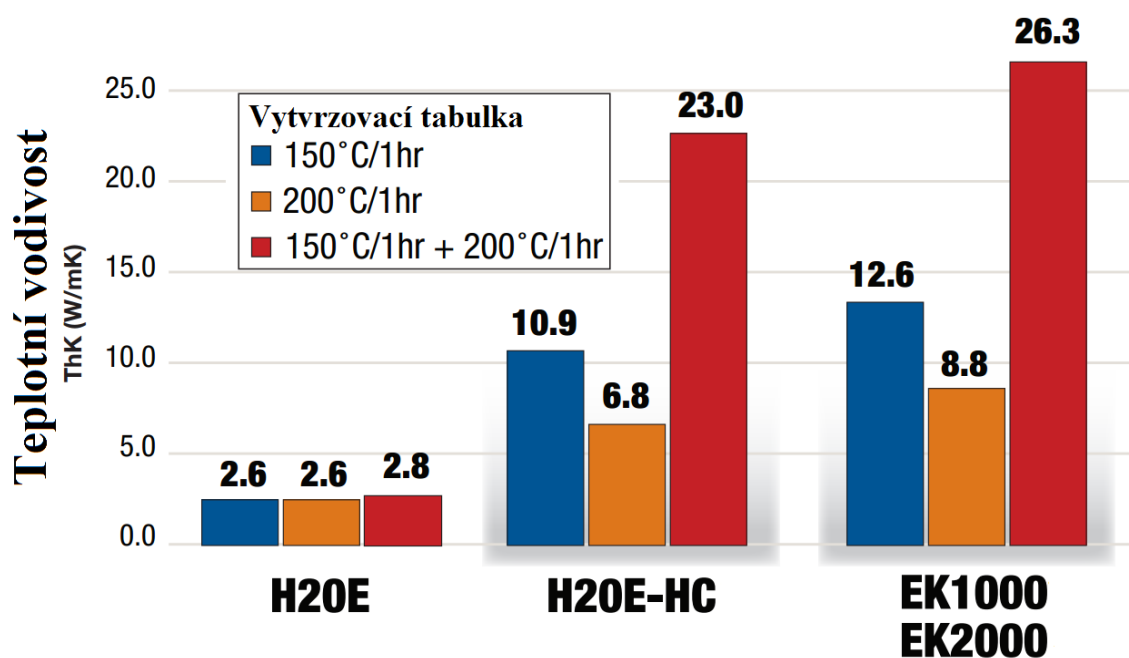
Adhezivní materiály zasahují do všech oblastí elektroniky jak je vidět na obr. 4. V následující kapitole bude uvedena problematika adhezivních materiálů. Prvním odvětvím jsou materiály na připevnění čipu s nízkou hodnotou pnutí. Při rozdílných hodnotách koeficientu roztažnosti tato výplň kompenzuje pnutí mezi materiály. Dále materiál na pasivaci waferu proti vnějším vlivům.

Další částí jsou epoxidová dielektrika a impregnace cívek. Adhezivní materiály se používají na konektory a také na flexibilní kabely. Například v solárních článcích, LCD monitorech i zdravotnických zařízeních. Zakapávací hmota slouží k ochraně čipu a drátkových propojek. Při výrobě LED diod se používají tepelně vodivé materiály s dobrou odrazivostí. Jsou dva typy materiálu pro lisování pouzder, průhledný a bez přídavných látek. Teplotně vodivý obsahuje přídavné látky zvyšující teplotní vodivost. Posledním použitím adhezivních materiálů je montáž chladiče na výkonové prvky [12].



Obr. 6: Oblasti použití adhezivních materiálů [13]

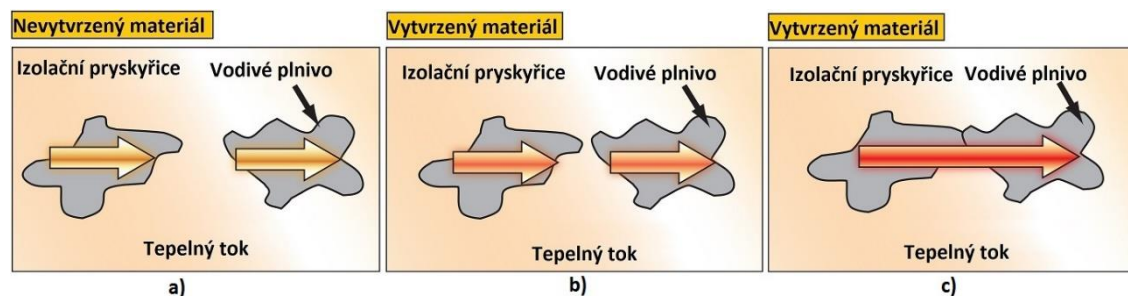
U adhezivních materiálů je nejdůležitější jejich způsob a doba vytvrzení. Z tohoto pohledu lze tyto materiály rozdělit do skupin vytvrzované pomocí UV, UV + teplem, teplem a viditelným světlem. Pro různé aplikace jsou vhodné různé metody vytvrzování. Pro aplikace, kde není žádoucí, aby docházelo k velkému teplotnímu zatěžování, je vhodnější použít jen UV vytvrzování. V případech kdy je nutné vytvořit spoj s velkou pevností ve střihu, je nutné vytvrzovat vyšší teplotou a delší dobu.



Obr. 7: Graf vytvrzení v závislosti na teplotě [9]

Z obr. 7 lze vidět jasná závislost vytvrzovací doby na teplotní vodivosti adhezivních materiálů a možnost tímto parametrem pohybovat v celém rozsahu. U některých součástek je nutná vysoká hodnota teplotní vodivosti, tak je nutno vytvrzovat materiál déle a u jiné stačí jen přilepit čip. V obou případech je možné použít stejný materiál s nutností vytvrdit jej jinou dobu. Jak je uvedeno výše, je několik možností vytvrzování, a tím je tedy možné vytvrzovat tyto materiály i lokálně.

Na obr. 8 můžeme vidět princip nastavení teplotního odporu adhezivních materiálů. Část a) znázorňuje nevytvrzený materiál, kdy jsou od sebe tyto dvě složky vzdáleny tak, že tepelný tok je velmi malý. Na části b) lze vidět vytvrzený materiál, kde došlo ke smrštění a materiál lépe vede. V tomto případě je nastaven odpor materiálu na střední úroveň. Na části c) vidíme dokonale vytvrzený materiál, který dosahuje největšího možného teplotního toku.



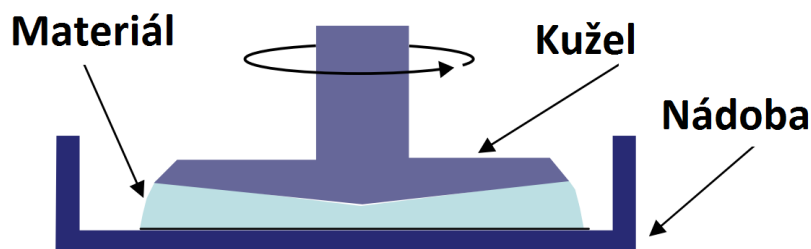
Obr. 8: Princip nastavení teplotního toku adhezivního materiálu [9]

Viskozita a reologie jsou jedny z nedůležitějších pojmů u adhezivních materiálů, určující jejich vlastnosti. Především pro jejich nanášení. Používanou jednotkou viskozity je „poise“. Viz rovnice (1),(2), kde jsou uvedeny vztahy mezi jednotkou poise a jednotek SI.

$$1P = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1)$$

$$10P = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (2)$$

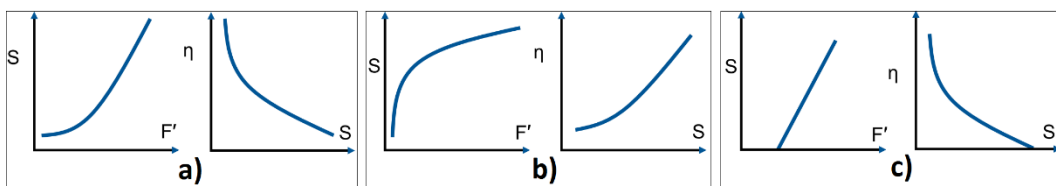
Viskozita je pojem popisující vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Čím více vnitřního tření, tím více síly je potřeba k tomu materiál „rozetřít“. Tedy nízko viskózní kapalina jako voda potřebuje mnohem méně síly k tečení, nežli vysoce viskózní materiál jako pájecí pasta. Síla potřebná k rozetření materiálu se měří a zaznamenává tzv. viskozimetrem (obr. 9). Princip viskozimetrie je snadný. Do nádoby se umístí měřený materiál a otáčivý kužel měří točivý moment potřebný k „rozetření“ materiálu. Točivý moment je přímo úměrný smykovému napětí v materiálu. Ze známého geometrického tvaru kuželu, počtu otočení a napětí vyvolaného točivým momentem zjistíme výslednou hodnotu viskozity. Ve většině případů se měří viskozita při jedné otáčce a při deseti, anebo při deseti a sto otáčkách. Poměr těchto výsledků je „thixotropic Index“, tedy index tixotropnosti. Například při 1 otáčce za minutu je naměřeno 10,000 cP ( $1P = 100\text{cP}$ ) a při 10 otáčkách za minutu je naměřeno 15,000 cP, je index tixotropnosti podíl těchto hodnot a výsledkem je 1,5. Tento údaj je klíčový při vybírání materiálu pro dispenzní nanášení.



Obr. 9: Princip funkce viskozimetru [9]

Na obr. 9 jsou vyobrazeny tři základní podskupiny nenewtonských kapalin, které určují vlastnosti právě adhezivním materiálům. Jde o závislost smykové rychlosti a smykového napětí. Druhým grafem je závislost viskozity na smykovém napětí. Jsou to pseudoplastické, dilatantní a plastické materiály.

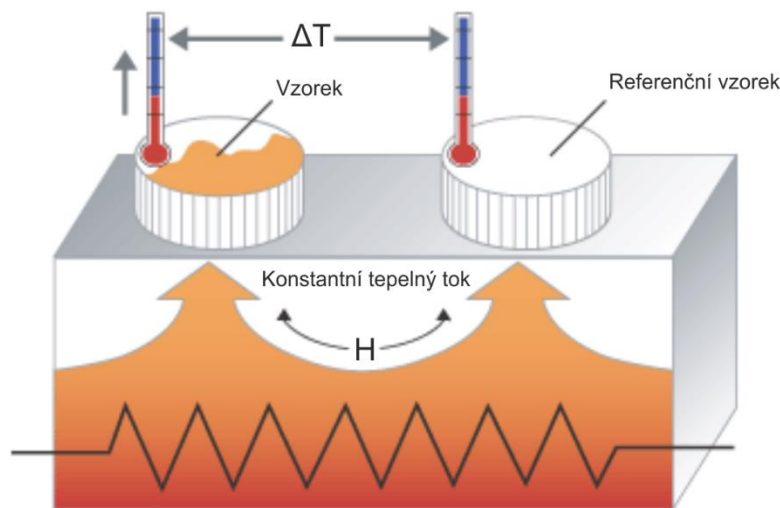
První z obr. 10 je a) pseudoplastický materiál, který se vyznačuje tím, že při zvýšeném tlaku se snižuje viskozita materiálu. Typem b) je dilatantní materiál vyznačující se zvýšenou viskozitou při zvýšeném tlaku. Posledním typem je typ c) plastický, který se vyznačuje tím, že materiál je pevný do určité hranice potřebné síly. Pokud je hranice překročena materiál začne „téct“.



Obr. 10: Závislost smykové rychlosti na smykovém napětí [9]

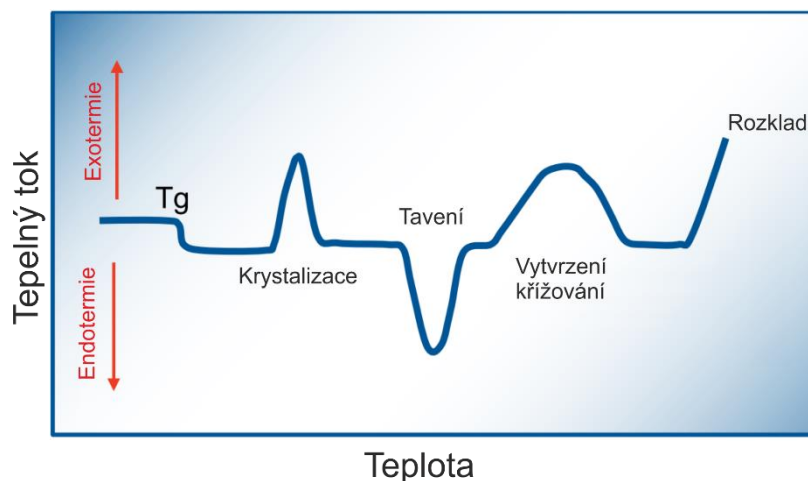
Epoxidové materiály mohou nabývat všech výše uvedených vlastností, a proto je důležité s těmito vlastnostmi počítat při výběru materiálu z pohledu stylu nanášení. Dalším důležitým parametrem je již zmíněná tixotropnost. Při zvýšeném tlaku se zvyšuje viskozita, této vlastnosti se využívá při používání šablono-  
vého tisku. S působením času se viskozita snižuje. Všechny uvedené parametry jsou definicí reologie, tedy vědou zabývající se deformací a tokem materiálů.

Velmi důležitou součástí adhezivních materiálů je měření energie potřebné k vytvrzení. Přístroj, který se používá pro tato měření, se nazývá diferenční kompenzační kalorimetr (DSC). DSC měří energii, tedy spíše teplotní tok, kterou materiál absorbuje nebo generuje vůči referenčnímu vzorku (obr. 11). Do jednoho kalíšku se umístí vzorek adhezivního materiálu a do druhého kalíšku se umístí referenční vzorek ze známými hodnotami pro chemické změny v materiálu. Těmto vzorkům je dodávána konstantní energie a měří se rozdílná hodnota teploty ve vzorcích a tepelný tok. Při chemické změně v materiálu jako jsou tavení, vytvrzení či rozklad se uvolní nebo generuje značná část energie.



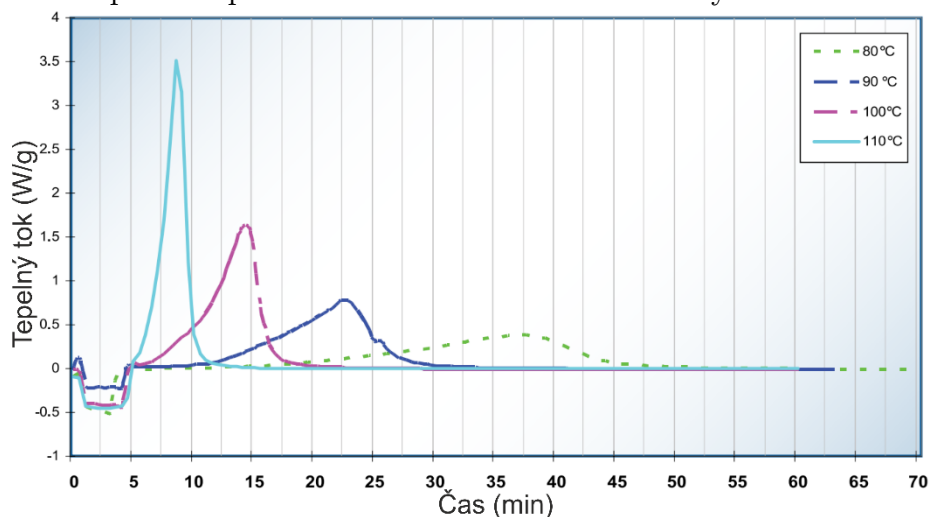
Obr. 11: Diferenční kompenzační kalorimetr [14]

Z obr. 12 lze rozeznat podle specifické energie, o jaký chemický proces se jedná a především jakou hodnotu energie k této změně materiál potřebuje. Tento obrázek zobrazuje možný výstup z rozboru na DSC.



Obr. 12: Chemické reakce při diferenční kompenzační kalorimetrii [9]

Základní rozdělení je na reakce endotermické tedy ty, které absorbují energii a na exotermické, které energii generují. Krystalizace a vytvrzení jsou zástupci exotermické reakce a tavení je reakce endotermická. Diferenční kompenzační kalorimetrie se používá především na nastavení velikosti vytvrzovací křivky.

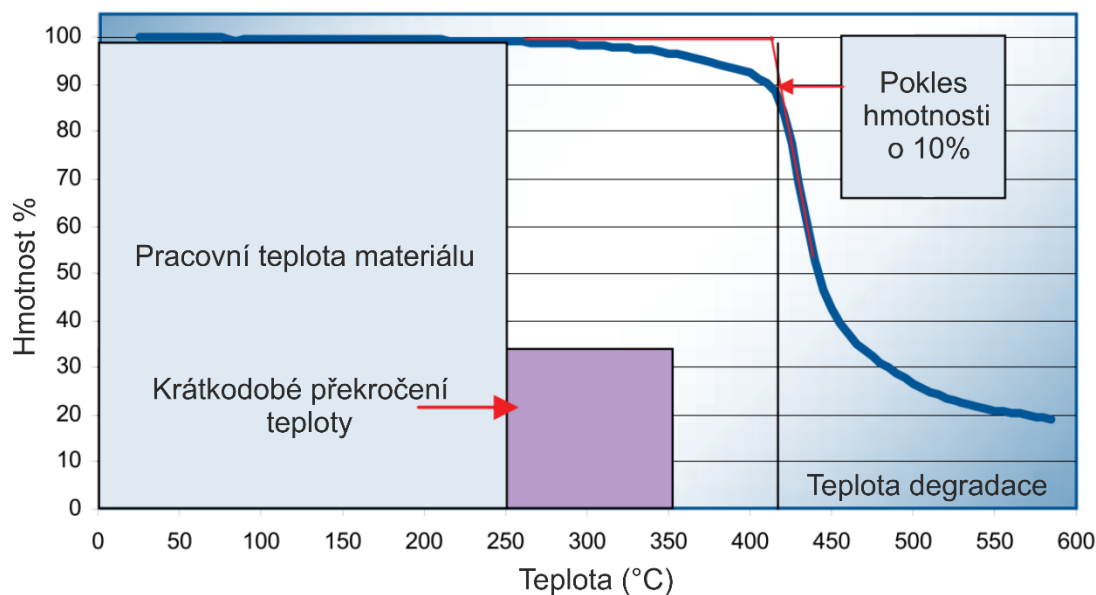


Obr. 13: Závislost tepelného toku na době vytvrzení [9]

Na obr. 13 lze vidět závislost dodané energie na době vytvrzení materiálu. Některé aplikace mohou vyžadovat nízké teplotní zatížení, tak je nutné vytvrzovat adhezivní materiál podle zelené čárkované křivky. V případě, že není nutné udržovat nízké teplotní zatížení je vhodné použít kratší dobu vytvrzení, kdy se časová náročnost sníží o 80%. Je nutné říci, že čím rychleji se adhezivní materiály vytvrzují, tím více vzniká vnitřní pnutí v materiálu, a klesá pevnost spoje. Tato pevnost určuje pevnost ve stříhu. Vysoká pevnost se vyznačuje výdrží nad 10kg, střední pevnost je v rozmezí 5 – 10kg a nízká pevnost 5 a méně. Pokud je nutná vysoká teplotní vodivost používá se dvojitá vytvrzení například 1h 150°C a 1h 200°C tento postup se používá k dosažení maximální teplotní vodivosti viz obr. 7.

Důležitou vlastností adhezivních materiálů je stárnutí a degradace materiálu pod vlivem teploty. Pro zjištění těchto vlastností se používá termogravimetrie (TGA). Princip termogravimetrie spočívá v zahřívání materiálu a měření jeho hmotnosti. Zámostné měření je poměrně složité, nesmí dojít k znečištění prostředí, a proto probíhá měření v kontrolované atmosféře. Na obr. 14 lze vidět příklad pro procesní okno pro degradaci materiálu. Tento graf je výstupem termogravimetrie, z tohoto grafu lze zjistit degradační teplotu materiálu. Jsou dva způsoby zjištění této hodnoty. První je proložení křivek viz obr. 14 červené úsečky. Průsečík je v bodě 415°C. Druhým způsobem je vyznačení teploty, která způsobuje pokles hmotnosti o 10%. V tomto případě tato hodnota připadá na teplotu 420°C. Hodnota procesního okna pro pracovní teplotu je vždy o 150°C méně, nežli naměřená hodnota a pro procesní okno krátkodobého překročení teploty o 50°C. V tomto případě se přidává ještě 20°C jako bezpečnostní faktor, takže výsledné hodnoty jsou nastaveny na 250°C a 350°C. Na obrázku jsou zobrazeny dvě části procesního okna. Prvním z nich je pracovní teplota materiálu, v této části je možné se pohybovat dlouhodobě a nedojde k degradaci materiálu. Další částí je krátkodobé překročení, a v této části je možné se s materiálem pohybovat po určitou dobu.

Udávanou hodnotou u adhezivních materiálů je teplotní stabilita. Hodnota značící úbytek materiálu při teplotě 200°C, 250°C a 300°C. V tomto případě je úbytek 0,45%; 0,87% a 1,59%. Dvě nejvyšší normy zabývající se touto problematikou jsou „MIL-STD 883 Method 5011“. Pro splnění této normy je nutné, aby došlo při teplotě 200°C k úbytku maximálně 1%. Druhou je „NASA outgassing requirement“ v tomto případě je nutná, aby materiál ubyl na váze maximálně 1% při 125°C za 24 hodin ve vakuu.



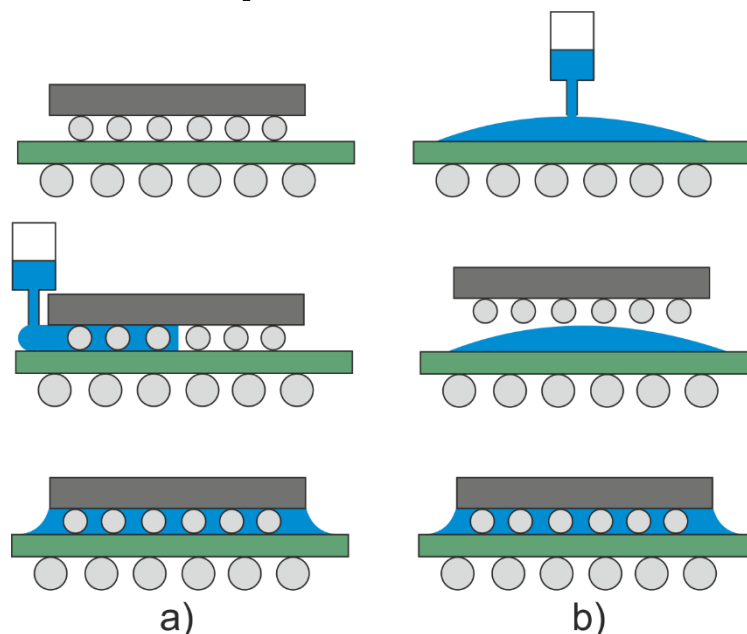
Obr. 14: Graf teplotní degradace materiálu [9]



### 1.3 Problematika underfilu

Flip chip (bare chip), v českém jazyce známý pod jménem obrácený čip (holý čip), je více jak 30 let stará technologie. Důvodem vytvoření holého čipu byla nutnost splnění technologických potřeb a to excelentního elektrického výkonu, miniaturizace zařízení, vysoký počet vstup/výstup a vysoké pracovní frekvence. Jedná se o nakontaktovaný čip připájený na desku pomocí BGA. Underfil je výplň mezi kuličkami a čipem. Důvod použití underfilu je rozdílná hodnota teplotní roztažnosti použitých materiálů. Největší technologickou slabostí je pole kuličkové pájky. Je zřejmé, že použití underfilu je také otázkou po montážní spolehlivosti pouzdra. Jak je výše uvedeno, je nutné kompenzovat rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti. Čip má přibližně  $2.6 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$  a nosný substrát  $12\text{-}16 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$ . Z pohledu spolehlivosti je nutné tyto rozdílné síly vyrovnat.

Na obr. 15 je vyobrazen flip čip se dvěma základními způsoby nanášení underfilu. Další skupinou jsou WUF (wafer-level underfill) a MUF (molded underfill). Prvním je „klasický“ způsob, kdy se pomocí dispenzeru nanese adhezivum, které samovolně pronikne mezi kapiláry kuličkové pájky. Druhým typem tzv. no-flow, tedy hmota, která samovolně nezateče mezi kapiláry, ale je nanesena před montáží a pouzdro je do něj zatlačeno. V tomto případě je nutné přizpůsobit vytvrzení/přetavení tomuto způsobu.

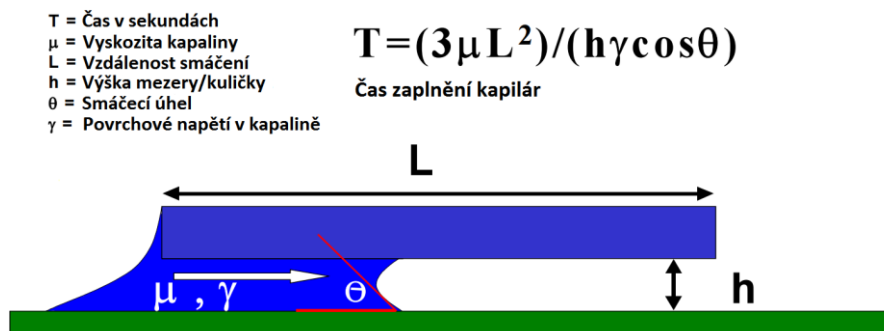


Obr. 15: Základní metody nanášení underfilu

Na obr. 16 lze vidět největší nevýhoda po montážní aplikace underfilu a to je čas potřebný k prostoupení underfilu pod součástku. Další nevýhoda vychází se snižující se velikosti kuliček použité u velmi malých flip čipů, kde byl tento



postup nanášení velmi problematický. Proto bylo nutné přijít z jiným technologickým postupem.



Obr. 16: Čas nutný k zaplnění kapilár [15]

Jde o výše zmíněný „no flow“ způsob. Největší výhodou je zjednodušení postupu, kdy není nutné přetavení součástky, nanesení underfilu a vytvrzení underfilu, ale v jedné části výroby provést více technologických kroků. Podle[16] usnadní použití NUF technologický postup o 5 kroků Toto ulehčení způsobí zvýšení produktivity výroby, snížení energetických nákladů a tedy finanční zisk. Složení tzv. NUF (No-flow underfil) materiálů je poněkud rozdílné od materiálu pro kapilární použití. Z důvodu vytvrzení zároveň při přetavení pájecích kuliček. Další výhodou je, že NUF materiály většinou obsahují speciální tavidla, tak není nutné používat přídatná tavidla na pájecí kuličky. Za velmi důležitou výhodu lze považovat, že vytvrzovací profil je totožný s profilem přetavení pájky. Profil je uzpůsoben tak, aby formování (pokles) kuliček proběhl při tekutém stavu underfilu a k jeho polymerizaci dojde až na konci přetavovacího profilu.

Mezi kvalitní materiály pro underfil se řadí Loctite 3536 od firmy Henkel, který byl navrhnut pro tvrdnutí při nízkých teplotách (5 min - 120°C) z důvodu teplotního namáhání ostatních součástek. Tento materiál je navržen i pro možnou demontáž čipu. Teplota tavení tohoto materiálu je 240 °C [17].

Tab. 2: Nabídka kapilárních underfilů od firmy EPO-TEK ( podle [18])

Typ EPO-TEK	Barva před/po	Teplota tuhnutí	T <sub>g</sub>	Teplota degradace	Doba skladování
301-2	čirá	80°C – 3 hod	80°C	360°C	1 rok
	bezbarvá	23°C – 2 dny			
353ND	žlutá	150°C – 1 min	90°C	412°C	1 rok
	červená	80°C – 30 min			
930-4	šedá	150°C – 1 min	90°C	425°C	1 rok
	žlutá	80°C – 6 hod			
OE121 Black	černá	90°C – 1 hod	55°C	350°C	1 rok
	černá	23°C – 2 dny			

## 1.4 Výběr pouzdríciho materiálu

Výběr materiálu pro elektronické pouzdření je proces, který zahrnuje mnoho možností a není zcela jednoznačně jasné, že počáteční materiál bude finálním. Výběr pouzdríciho materiálu je multidisciplinární problematika, která zahrnuje hledání rovnováhy mezi provedením, funkčností, výrobitelností, spolehlivostí a cenou. Z důvodu vysokého počtu materiálových vlastností, které je potřeba při výběru uvažovat, není technologicky možné najít materiál splňující všechny zadané požadavky. Ve větší míře končí výběr pouzdríciho materiálu kompromisem mezi zadáním a technologickými možnostmi. Z pohledu materiálových vlastností jsou považovány za důležité: elektrické, chemické, teplotní vlastnosti, váha a zejména mechanická odolnost. V minulosti nebyl kladen takový důraz na pouzdření, kdy se vyrobený čip zapouzdřil do určitého pouzdra, a ve většině případů rozhodovala jen velikost pouzdra. V dnešní době se na pouzdření klade mnohem větší význam, protože i vybraný substrát či umístěný součástky rozhoduje o jakosti celého systému. Jak z pohledu teplotního zatížení nebo vibrací. Pro snadnější rozhodování při výběru vhodného materiálu lze použít diagram znázorněný níže.

Diagram výběru pouzdríciho materiálu [Podle 7]

A) DEFINOVAT HLAVNÍ FAKTORY PRO NÁVRH UVAŽOVANÉ APLIKACE:

oblast budoucího využití součástky (pouzdra), jestli např. v automobilovém průmyslu, letectví, spotřební elektronice, lékařství...



B) DEFINOVAT NADŘAZENÉ ÚVAHY, KTERÉ ZÚŽÍ POLE VÝBĚRU: stanovit si zhruba pracovní podmínky a nároky na pouzdro (např. rozmezí pracovních teplot, pracovní výkon a s tím spojený odvod tepla apod.) a podle toho vybrat stěžejní parametry, které budeme sledovat



C) PŘEZKOUMAT TYPICKÉ APLIKACE VZTAHUJÍCÍ SE K VÝBĚRU MATERIÁLU:

vzít si již konkrétní aplikaci a přezkoumat ji vzhledem k bodu B



D) SESTAVIT SEZNAM NEJPRAVDĚPODOBNĚJŠÍCH A NEJVÍCE SE HODÍCÍCH MATERIÁLŮ: vytvořit si tabulku s kandidáty a s jejich vlastnostmi, které považujeme za kritické vzhledem k budoucímu využití



E) SROVNAT VLASTNOSTI VYBRANÝCH MATERIÁLŮ A VYBRAT JEDEN NEBO VÍCE MATERIÁLŮ, KTERÉ SE NÁM JEVI JAKO NEJVÍCE VYHOVUJÍCÍ:

vybrat nejvhodnější kandidáty s nejvíce vyhovujícími vlastnostmi



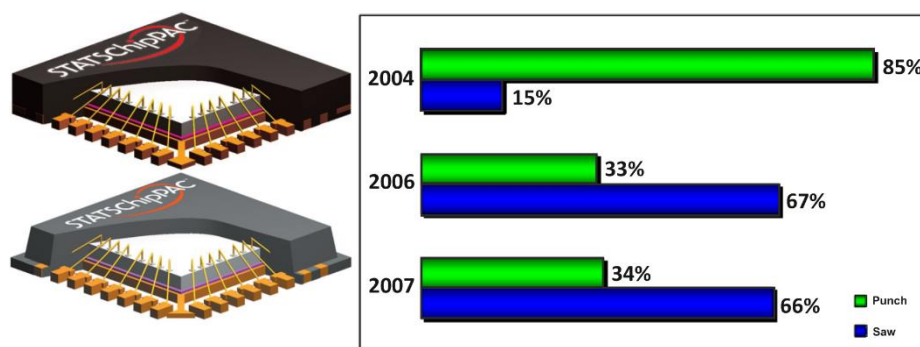
F) OTESTOVAT KAŽDÝ VYBRANÝ MATERIÁL FYZICKY A NA NÁMI ZVOLENÁ KRITÉRIA, ABYCHOM OVĚŘILI VHODNOST JEHO POUŽITÍ:

testovat stěžejní parametry vybraných materiálů a zvolit si nejlepšího kandidáta

## 2 POROVNÁNÍ POUZDER QFN A BGA

### 2.1 Pouzdro QFN

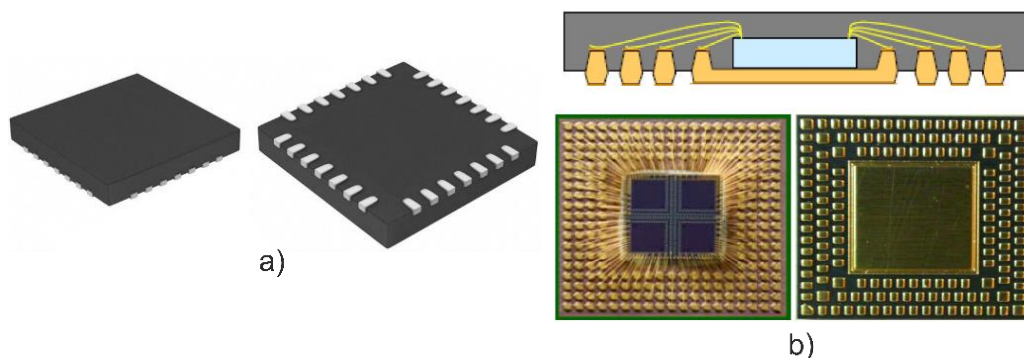
Zkratka pouzdra vychází z anglického Quad flat no-leads tedy bez vývodové pouzdro s ploškami po čtyřech stranách viz obr. 17. Na rozdíl od pouzdra QFP nemají pouzdra QFN vývody a při návrhu je možné tyto elektronické součástky designovat blíže k sobě. Absence vývodů velkou mírou zvyšuje spolehlivost celého systému. Jsou zde normy udávané institucemi IPC (IPC-7093) a JEDEC (MO-247-D), ale rozdělení pouzder si každý výrobce určuje samostatně. Za základní rozdělení by se dalo považovat typ „S“, „Punch“ a E. Kdy typ „S“ má plošky jen na spodní straně pouzdra. Typ „E“ pouze po stranách a typ „Punch“ má plošky vyvedené po bocích pouzdra a jsou viditelní i shora [19].



Obr. 17: Pouzdra QFN vyrobené metodou Saw, Punch

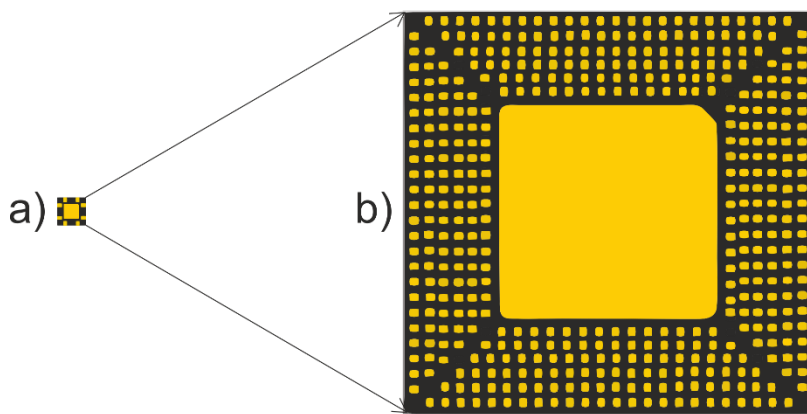
a jejich zastoupení na trhu (podle [20], [21])

Standardní verze pouzdra má rozloženy pájecí plošky na všech čtyřech stranách, ale jsou i verze, které mají plošky jen na dvou stranách, tyto pouzdra se značí DFN (Dual Flat No Lead). Další značení je například UQFN a UDFN, U v tomto případě znamená Ultra-thin, v překladu ultra tenké a je to charakteristika vývodů. Často používané jsou také a QFN (advanced QFN) nebo QFN-MR (multi-row) viz obr. 18b v tomto případě se technologové vyřešili jednu z nevýhod QFN pouzdra a tím je omezený počet vývodů v porovnání s pouzdem BGA. Tento problém řeší výše zmíněné multi-row pouzdro, tedy pouzdro QFN, které obsahuje více řad vývodů.



Obr. 18: a) Klasické pouzdro, b) QFN a QFN-MR (podle [22], [23])

Jak bylo výše uvedeno, každý výrobce značí různá pouzdra jinak. Zde budou rozebrány typy pouzder od firmy STATS Chip PAC, která nabízí nejrozsáhlejší nabídku. V sekci klasických QFN a Dual row pouzder nabízí typ saw a punch, tedy pouzdra vyřezaná nebo vystřižená. Velikosti jsou od (1 x 1,3) mm do (12 x 12) mm. Počet vývodů je od 4 do 156 kdy horní hranice je limitována použitím jen dvou řad vývodů. Vzdálenost vývodů je od (0,4 do 0,8) mm. Pouzdra jsou optimalizovaná pro bezolovnaté pájení. Je redukována velikost o 50% vůči typu TSSOP (Thin Shrink Small Outline Package) a také váha o 33%. Pouzdra jsou testována v 1000 teplotních cyklech od -65°C do + 150°C a v maximální skladovací teplotě 150°C po dobu 1000 hodin. V tab. 2. je uvedena nabídka pouzder QFN, QFN-DR a QFN-MR od firmy STATS Chip PAC. Nabídka prvních dvou typů pouzder je klasická jako u jiných firem. Ale nabídka víceřadých QFN pouzder je jedinečná a technologicky tyto pouzdra dosahují maxima vyrobiteľnosti a použitelnosti viz obr. 19. Pokud má pouzdro rozměry (15 x 15)mm a obsahuje 700 vývodů, kdy je jejich rozteč 0,40 mm, je jasné, že pájení těchto pouzder bude více než problematické [24].



Obr. 19: Technologické možnosti pouzdra QFN

a) 8 vývodů - 1x1 mm b) 464 vývodů - 15x15 mm

Tab. 2: Nabídka pouzder QFN, QFN-DR a QFN-MR. [Podle 25]

QFN a QFN-DR(*)			QFN-MR (6 řad, rozteč vývodů 0,4mm)	
Rozměry (mm)	Rozteč vývodů (mm)	Počet vývodů	Rozměry (mm)	Počet vývodů
1 x 1	0,50	4	7 x 7	220
2 x 2	0,65/0,50	4/8	8 x 8	268
2 x 3	0,50	6/8	9 x 9	340
3 x 3	0,80/0,65/0,50/0,40	4/8/12/16/20	10 x 10	388
4 x 4	0,80/0,65/0,50/0,40	12/14/16/20/24/28	11 x 11	460
5 x 5	0,80/0,65/0,50/0,40	14/16/20/28/32/40	11,5 x 11,5	484
6 x 5	0,80/0,65/0,50	18/20/22/32	12 x 12	508
6 x 6	0,80/0,65/0,50/0,40	24/28/32/36/38/40/48	13 x 13	580
7 x 7	0,80/0,65/0,50/0,40	28/32/36/40/44/48/56	14 x 14	628
8 x 8	0,80/0,65/0,50/0,40	36/40/44/52/56/64	15 x 15	700
9 x 9	0,65/0,50/0,40	44/48/56/60/64/72		
10 x 10	0,50/0,50*/0,40	64/68/72/84/88/132*		
11 x 11	0,50/0,50*	80/148*		
12 x 12	0,50/0,50*	88/156*		

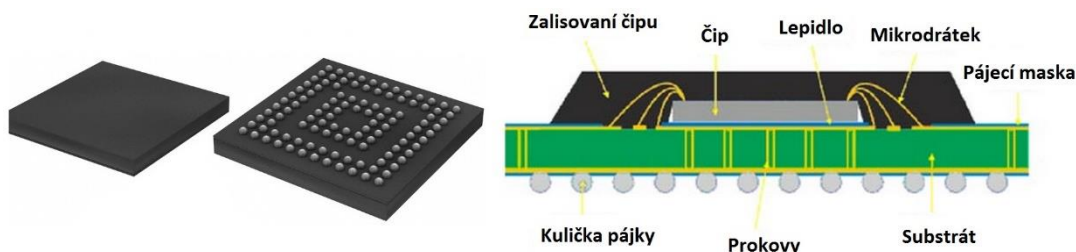
## 2.2 Pouzdro BGA

Zkratka pouzdra vychází z anglického slova Ball grid array tedy „pole kuliček“. BGA pouzdro má na spodní straně situovány vývody, na kterých jsou kuličky pájky. Na obr. 20 lze vidět řez pouzdem BGA. V tomto případě je čip přilepen na tzv. interposeru, tedy substrát pro snazší rozvedení signálů. Velikost pájecích kuliček je v rozmezí od 1 mm až desítky  $\mu\text{m}$ . Počet kuliček se pohybuje od 4 do několika tisíc. Vznik tohoto pouzdra byl z důvodu velké integrace součástek a miniaturizace. V provedení CSP (chip scale packages) je objem pouzdra minimální a součástka nezabírá tolik prostoru. CSP BGA je nejspíše nejpoužívanější verze BGA pouzdra. Parazitní vlastnosti BGA pouzder jsou o mnohé lepší, nežli u starších pouzder jako např. SOIC, PLCC atd.

Vznik pouzdra BGA sahá do 90 let 20. století, takže je mnohem starší nežli pouzdro QFN. Z toho vyplývá, že je nepřeberné množství typů BGA pouzder a jejich řazení lze provádět podle mnoha parametrů. Základní rozdělení lze provést podle použitého substrátu. A to je MBGA (železný substrát), CBGA (keramický

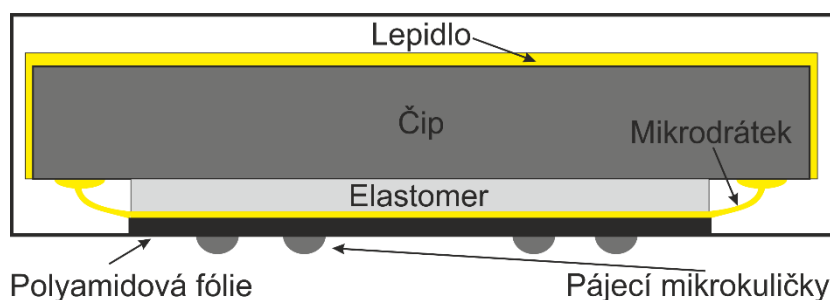
substrát), PBGA (plastový substrát) a TBGA (pouzdra na pásku). Velmi používaná varianta, ne-li nejpoužívanější, je FCBGA (Flip Chip BGA), kdy je čip obrácený a pájecími kuličkami připájen na substrát. Toto pouzdro se používá na většinu čipů v počítačích, mobilech a v modernější spotřební elektronice.

Další velmi zajímavou variantou je TEPBGA (Thermal Plastic BGA) pouzdro, které je navrženo pro lepší odvod tepla. Pouzdro obsahuje speciální plíšek, který je zaveden do objemu součástky a vyveden na horní straně pouzdra pro případné připojení externího chladiče. Dále také obsahuje „thermal balls with vias“. Uprostřed pouzdra situované pájecí kuličky připojené na prokovy vedoucí k čipu. I tyto pouzdra se používají na MEMS a MOEMS aplikace, kdy je v pouzdře připravená kavita pro sensoriku. Jak bylo uvedeno výše, typů pouzder BGA je nespočetné množství a v této práci jsou uvedeny ty nejvíce používané a perspektivní.



Obr. 20: Pouzdro BGA a řez pouzdrem BGA [26], [27]

CSP pouzdra v tomto případě DSBGA (obr. 21) jsou velmi perspektivní pouzdra. Zkratka DSBGA znamená „die size BGA“, volně přeloženo BGA velikosti čipu. Tento druh pouzdra je velmi rozšířený především v počítačích například čipy pamětí RAM a paměti v SSD disku jsou BGA pouzdra toho typu.

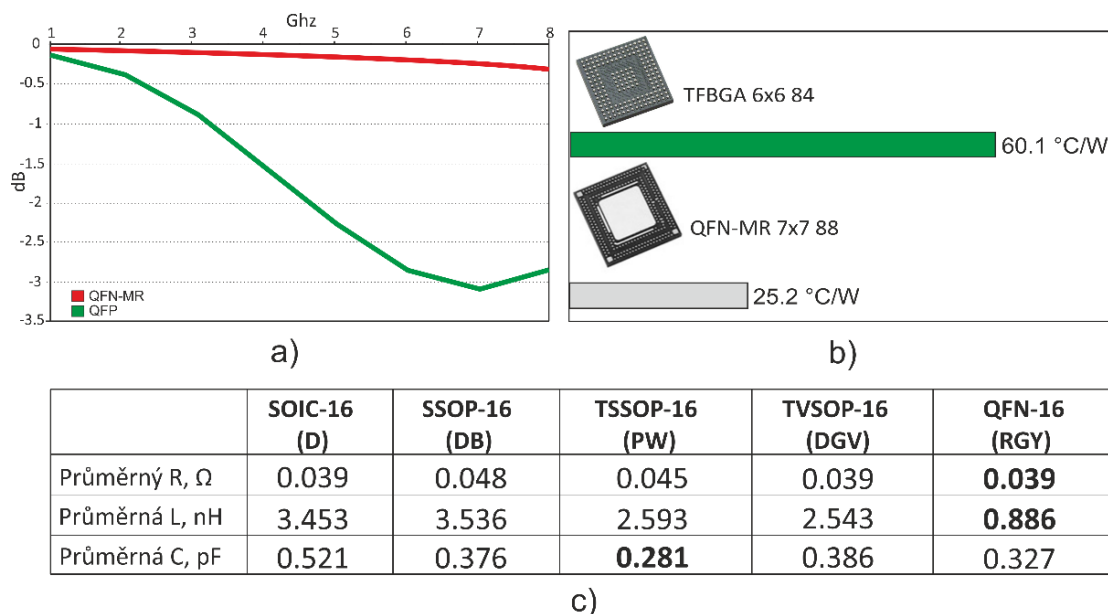


Obr. 21: Řez pouzdrem DSBGA

## 2.3 QFN versus BGA

Z obr. 1 na straně 12 lze vidět, jakým směrem se ubírá pouzdro QFN a to je miniaturizace při návrhu, což je také největší výhodou tohoto pouzdra. Z důvodu vysoké úrovně miniaturizace a krátkého elektrického vedení jsou parazitní

RLC hodnoty mnohem nižší, nežli u ostatních pouzder se stejným počtem vývodů a se srovnatelnou cenou (obr. 22c). Ztrátovost signálu v pouzdře QFN je také mnohem nižší než u pouzdra QFP viz (obr. 22a). Tepelný odpor v porovnání s pouzdry BGA je mnohem nižší obr. 22b je to z toho důvodu, že většina pouzder QFN mají tzv. thermal pad obr. 18b. Na spodní straně situovaný plíšek pro zvýšení tepelné vodivosti. S kombinací využití odvádění tepla skrze thermal vias (volně přeloženo „prokovy na odvedení tepla“) je tepelný odpor velmi nízký. Na druhou stranu se BGA pouzdra používají na grafických čipech v počítačích, kdy dosahují výkonu kolem 150W a odvádění tepla skrze PCB grafické karty není v tomto případě žádáno.



Obr. 22: a) Útlum signálu v QFP x QFN; b) Tepelný odpor TFBGA x QFN; c) RLC hodnoty různých pouzder (podle [28], [29])

Z pohledu spolehlivosti má QFN oproti BGA pouzdru nižší výdrž při teplotním cyklování ( $-40^{\circ}\text{C}$  až  $+125^{\circ}\text{C}$ ). Výdrž QFP je přibližně 10,000 cyklů, BGA 3000 – 8000 a QFN nejméně a to od 1000 – 3000 cyklů. Je to z důvodu technologické konstrukce, kdy se součástka skládá z více materiálů s rozdílnými teplotními roztažnostmi. Konstrukce pouzdra QFN nedovoluje tuto roztažnost kompenzovat, protože neobsahuje vývody jako QFP. V porovnání s konstrukcí BGA pouzdra, tedy spíše jeho připájení na desku je jasné, že v pájecích kuličkách je větší možnost kompenzace teplotní roztažnosti nežli v ploškách pouzdra QFN [30].

## 2.4 Zjišťování vlastností pouzder

Měření a testování vlastností pouzder obecně je velmi důležité technologické odvětví. Ve většině případů předchází výrobě pouzdra simulace a výpočet

předpokládaných vlastností a následně se vyrobí prototyp pouzdra, které projde několika testy. První z testů může být pájitelnost, kdy se otestuje, jak obtížné je připájet součástku. V případě QFN a BGA pouzder je to velmi důležitá část hlavně při vyšším počtu plošek (kuliček). Konečným testem v této sekci může být možnost opakovaného odpájení a připájení. Další skupinou testů může být mechanické namáhání pouzdra a test stříhem pro zjištění stupně trhlin, poškození pájeného spoje, ale i pevnost spoje. Mezi další měření vlastností patří měření tepelného výkonu pouzdra termovizní kamerou. Používaná metoda inspekce pouzdra je RTG.



## 3 TEPELNÉ CHOVÁNÍ POUZDER

Elektronické systémy se vyznačují určitou spotřebou energie. Fyzikální podstatou je přeměna elektrické energie na energii tepelnou. Z toho vyplývá, že veškeré elektronické systémy a zařízení jsou ovlivňovány teplem. Z hlediska vlastní funkce systému to znamená změnu pracovních podmínek, parametrů a má to také velký podíl na spolehlivosti a celkové životnosti. Teplo je v elektronických systémech generováno pasivními prvky (vedlejší projev průchodu elektrického proudu a důsledek polarizačních mechanismů) a aktivními prvky, kde jsou zdrojem tepla zejména polovodičové přechody.

Tepelná energie látek se projevuje kmitavým pohybem částic. V pevných látkách jsou částice vázány na krystalografickou mřížku a vykonávají jen malé kmity kolem definované polohy v mřížce. Vazební síly částic u kapalin a plynů jsou mnohem menší, a proto vykonávají větší kmity a z důvodu malých vazebních sil se mohou pohybovat prostředím. Teplo se šíří několika způsoby v závislosti na skupenství a na vlastnostech šíření. Existují tři způsoby šíření tepla: vedení, proudění a záření.

### 3.1 Přenos tepla

#### 3.1.1 Přenos tepla vedením

U pevného skupenství látek se uplatňuje přenos tepla vedením. V určitých případech se tento způsob může uplatnit i u kapalných i plynných látek a to tehdy, když kapalina zůstává v klidu a proudění je zanedbatelné. Pohybová energie kmitajících částic se z důvodu vzájemných srážek při chaotickém tepelném pohybu přeměňuje na teplo. Tepelnou energii předávají částice s vyšší hodnotou energie částicím s nižší energií (teplotou). Tepelný tok  $Q$  značí množství tepla, prostupujícího plochou  $S$  o teplotním rozdílu  $\Delta T$ . Lambda  $\lambda$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ] značí tepelnou vodivost materiálu [31].

$$Q = \lambda \cdot S \cdot \Delta T \quad [W] \quad (3.1)$$

#### 3.1.2 Přenos tepla prouděním

U látek kapalných a plynných se uplatňuje především přenos tepla prouděním. Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, i v tomto případě částice vykonávají tepelný pohyb, ale vzhledem k slabým silám mezi vazbami dochází i k otáčivému a posuvnému pohybu, tedy k proudění. Při působení tepla na kapalinu či

plyn se začne v místě styku látka ohřívat. Tento jev má za následek snížení hustoty a kapalina nebo plyn stoupá vzhůru. Na její místo se dostává kapalina či plyn s nižší teplotou a celý proces se opakuje. Tímto způsobem vzniká volné proudění. Intenzitu tohoto proudění lze ovlivňovat množstvím dodávané tepelné energie. Tepelný tok  $Q$  značí množství tepla přeneseného mezi pevnou stěnou o teplotě  $T_{st}$  a tekutinou o teplotě  $T_t$ . Koeficient přestupu tepla  $\alpha$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ] je závislý na způsobu odebrání tepla ze stěny a není konstantní. Je mírou přestupu tepla na rozhraní prostředí, mezi kterými dochází k výměně tepla [31].

$$Q = \alpha \cdot S \cdot (T_{st} - T_t) \quad [W] \quad (3.2)$$

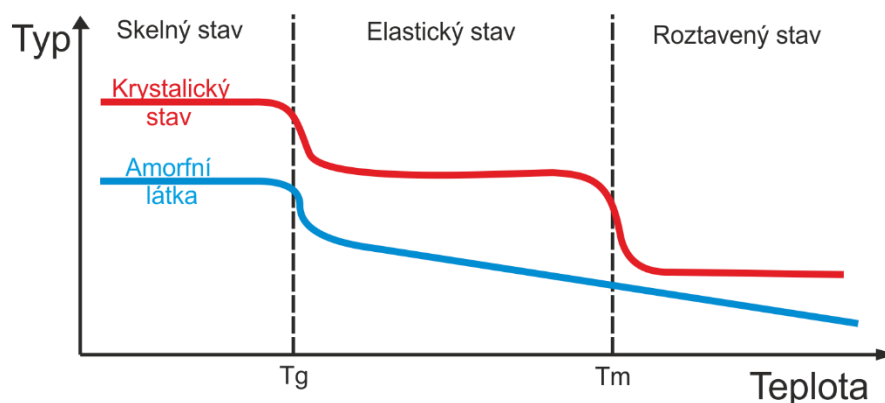
### 3.1.3 Přenos tepla zářením

Posledním způsobem přenosu tepla je záření. Fyzikální podstatou tohoto mechanismu přenosu tepla je elektromagnetické vlnění. Vlny se mohou šířit v hmotném prostředí i ve vakuu. Tomuto typu záření se říká teplotní záření. Rozsah vlnové délky tohoto záření je  $10^{-4}$  až  $10^{-7}$  m. Při vyzařování je velmi důležité jakou barvu má povrch tělesa. Přenos tepla je elektromagnetickým zářením mezi rovnoběžnými stěnami o ploše  $S$  [ $\text{m}^2$ ] a teplotách  $T_1$  a  $T_2$  [ $^\circ\text{K}$ ] v čase  $t$  [s]. Steffan-Boltzmannova konstanta  $\sigma$  má hodnotu  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ,  $\epsilon$  je poměrná emisivita tělesa a  $F_{1,2}$  je faktor viditelnosti, který udává prostor mezi povrchy [31].

$$Q = \epsilon_{s1,s2} \cdot \sigma \cdot F_{1,2} \cdot S \cdot [T_1^4 - T_2^4] \quad [W] \quad (3.3)$$

## 3.2 Teplota skelného přechodu

Zejména u plastů je teplota skelného přechodu důležitým materiálovým parametrem, kdy mezní stavy teploty skelného přechodu určují použití materiálu. Obr. 23 ukazuje teplotní vliv na různé druhy polymerů, dále lze vidět důvod použití krystalických polymerů (PP, PTFE) a tím je vysoká teplotní odolnost. Po překročení  $T_m$  (teplota tání krystalického podílu) začíná materiál vykazovat plastický stav (dochází k nevratné deformaci). Amorfní polymery (PVC, PMMA) jsou více závislé na teplotě, a proto mění strukturu při dosažení mezní hodnoty  $T_g$  a  $T_m$ . Do dosažení hodnoty  $T_g$  je amorfní podíl ve skelném tvaru. V rozmezí  $T_g$  až  $T_m$  se nachází v kaučukovitém tvaru vyznačující se vratnou deformací. Po překročení  $T_m$  dochází k plastickému stavu, tedy k nevratným deformacím při působení vnější síly [32].



Obr. 23: Teplota skelného přechodu (podle [33])

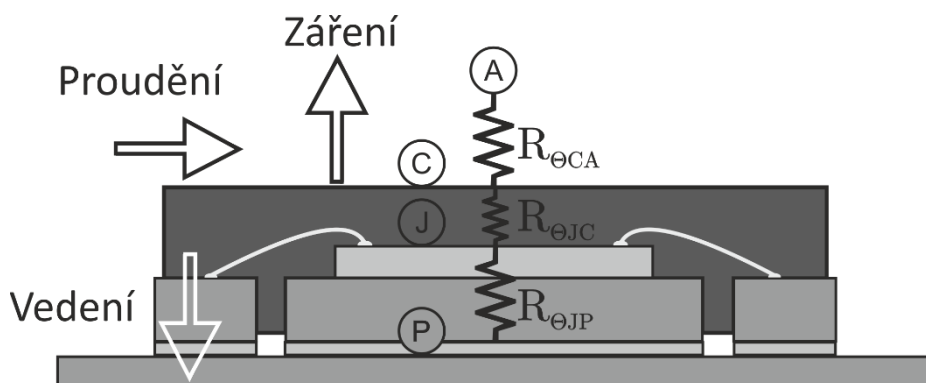
### 3.3 Náhradní tepelný obvod

Náhradní tepelný obvod se používá většinou ke správnému dimenzování chladiče na elektronický systém a také pro určení maximálního výkonového zatížení. Elektronický systém se rozdělí na určitý počet prvků. Každý prvek zastupuje určité prostředí a je nahrazen tepelným odporem, tepelnou kapacitou, zdrojem teploty a zdrojem tepelného toku. U náhradního tepelného obvodu je analogie s veličinami elektrickými viz tab. 3.

Tab. 3: Analogie mezi tepelnými a elektrickými veličinami [34]

Tepelný obvod	Jednotka	Analogie
Teplotní rozdíl	$\Delta T$ (K)	Rozdíl el. napětí
Tepelný výkon	$\Phi$ (W)	Elektrický proud
Tepelný odpor	$R$ ( $C \cdot W^{-1}$ )	Elektrický odpor
Tepelná vodivost	$\lambda$ ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	Elektrická vodivost

U zapouzdřených elektronických součástek se uvádí  $R_{JA}$  (Junction to ambient thermal resistance) v českém znění celkový tepelný odpor. Tento celkový tepelný odpor se skládá z  $R_{JC}$  (Junction to case) tepelného odporu mezi čipem a pouzdrem a  $R_{CA}$  (Case to ambient) tepelného odporu mezi pouzdrem a prostředím. Pokud obsahuje součástka přídavný chladič, přidá se do série další tepelný odpor. Na obr. 24 je zobrazen teplotní model QFN pouzdra [34].



Obr. 24: Zobrazení tepelného modelu QFN pouzdra

Celkový tepelný odpor se skládá z  $R_{CA}$ ,  $R_{JC}$  a  $R_{JP}$  (junction to pad), kde  $R_{JP}$  je tepelný odpor mezi čipem a ploškou pro odvod tepla. U pouzdra QFN 4 x 4 mm je uváděna hodnota  $R_{JA} = 32^\circ\text{C}/\text{W}$  a hodnota pro plošku na odvádění tepla  $R_{JP} = 10^\circ\text{C}/\text{W}$ . Maximální hodnota teploty je  $95^\circ\text{C}$  a hodnota teploty okolí  $T_{AMB} = 40^\circ\text{C}$ .

$$Q = \frac{T_{MAX} - T_{AMB}}{R_{JA} + R_{JP}} = \frac{95 - 40}{32 + 10} = 1,30 \text{ W} \quad (3.3)$$

Výsledná hodnota vyzářeného výkonu součástky je 1,3 W. U pouzdra s rozměry 4 x 4 mm je tato hodnota běžná.

### 3.4 Termomechanické pnutí

Problematika termomechanického pnutí je více než aktuální z důvodů miniaturizace, integrování součástek do jednoho systému a také 3D struktur. Na obr. 25 je vyobrazen princip termomechanického pnutí.

Krok a) znázorňuje přetavení kuliček při teplotě  $230^\circ\text{C}$ . V tomto je riskantní výskyt zkratů a nezapájení pouzdra.

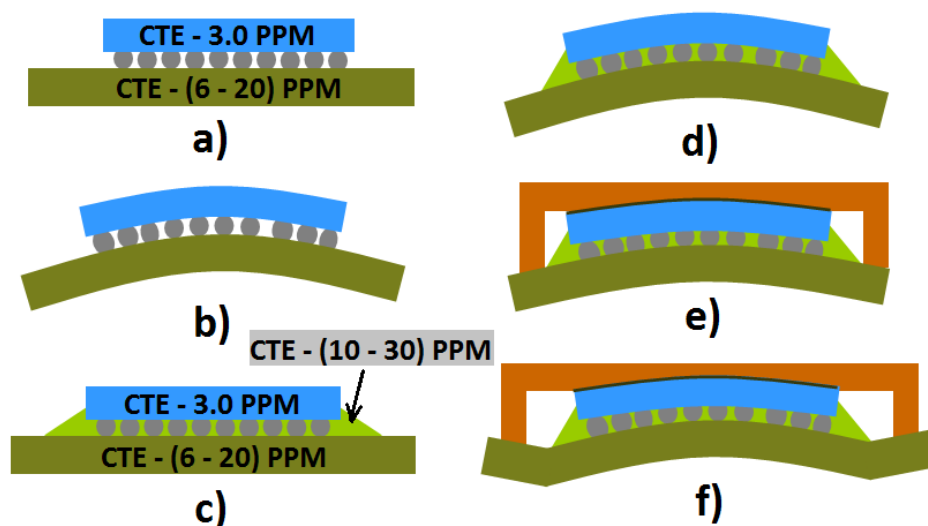
Bod b) znázorňuje chladnutí na pokojovou teplotu po přetavení. Zde lze vidět účinek rozdílných koeficientů roztažnosti, i u tak jednoduchého systému jako je BGA pouzdro. V tomto případě může dojít k delaminaci pájeného spoje a prasknutí čipu.

Bod c) znázorňuje zahřátí na teplotu  $200^\circ\text{C}$  z důvodu vytvrzení underfilu. Opět je zde možnost způsobení delaminace pájeného spoje a prasknutí čipu.

Bod d) znázorňuje chladnutí pouzdra. Je zde použit underfil, který je právě určen na kompenzaci termomechanického pnutí, ale i přesto tento jev nelze potlačit. Může zde docházet k praskání pájeného spoje, čipu, underfilu i substrátu z důvodu deformace celého systému.

Další krok e) znázorňuje přilepení měděného chladiče. I v tomto případě dochází k zahřátí na potřebnou teplotu lepidla.

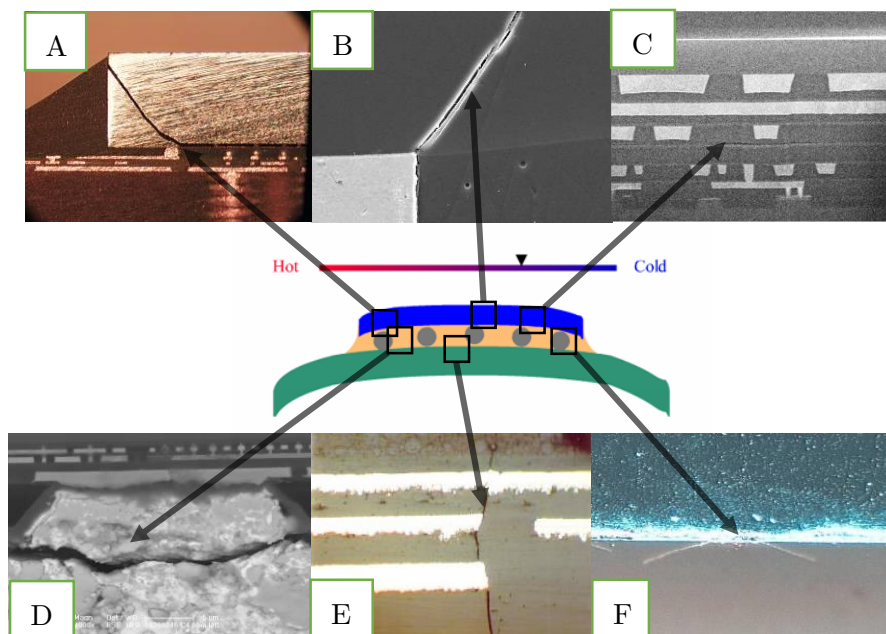
Posledním krokem je f) zde dochází ke chladnutí na pokojovou teplotu a velkým riskem je zde delaminace lepidla, underfilu, pájecí kuličky, prasknutí čipu a substrátu.



Obr. 25: Termomechanické pnutí v pouzdře BGA [35]

Tento příklad problematiky termomechanického pnutí je spíše základní. Například pouzdra MCM (multi-chip module) a více vrstvé elektronické systémy mají mnohem komplexnější a problematičtější termomechanické pnutí z důvodu použití více materiálů, čipů a nosných substrátů. A zanedbání řešení termomechanického pnutí v tak komplexních systémech má za následek kritické selhání celého systému. Součástky, které obsahují normu JESD22-A104D prošli cyklickou teplotní zátěží. Obvykle od  $-40^{\circ}\text{C}$  až  $120^{\circ}\text{C}$ . Testuje se celá série i tisíc kusů a určí se „cycles to failure“, tedy počet cyklů do poruchy. Výsledek z testování se zprůměruje a výsledná hodnota se zaznamená do datasheetu.

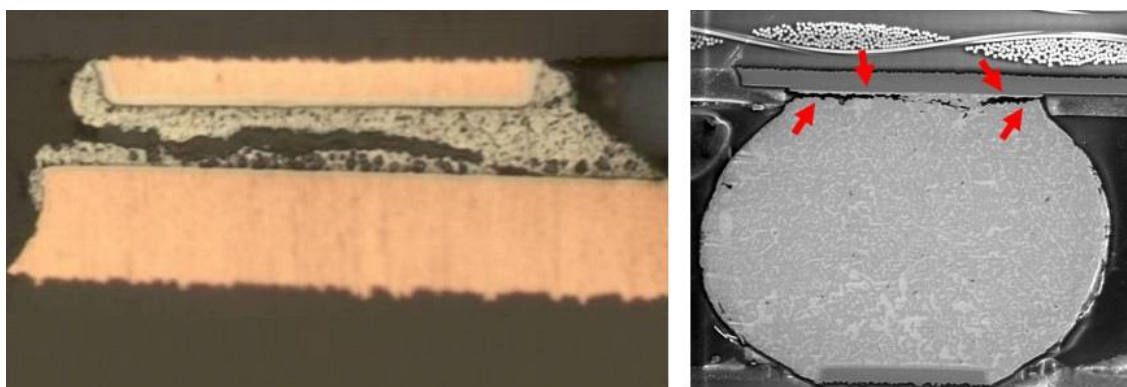
Na obr. 26 lze vidět, jaké defekty může způsobit podcenění problematiky termomechanického pnutí. V části A je vyobrazen častý defekt a to je prasknutí čipu. V části B lze vidět prasknutí pouzdra, ve kterém je čip. V části s označením C lze vidět defekt, kdy dojde k delaminaci vnitřní vrstvy křemíku. Část s označením D je nejčastější chybou a to je delaminace pájky, protože právě v tomto místě dochází ke kompenzaci rozdílných koeficientů roztažnosti součástky a nosného substrátu. Část E vyobrazuje prasknutí substrátu, tento defekt není tak častý jako D. Poslední částí je F, kde je vyobrazeno prasknutí underfilu, tedy materiálu určeného právě ke kompenzaci rozdílných koeficientu roztažnosti čipu a substrátu.



Obr. 26: Defekty způsobené termomechanickým pnutím [36]

Na obr. 27 jsou detailněji zobrazeny možné defekty způsobené termomechanickým pnutím v pouzdrech BGA a QFN. Na obrázku vlevo lze vidět, že došlo k prasknutí pájky spojující substrát a plošku pouzdra QFN. Tento mikro výbrus je z pouzdra, které prošlo 1000 cykly teplotního namáhání ( $-40^{\circ}\text{C}$  až  $+120^{\circ}\text{C}$ ) [37]. Ve většině případů dochází k defektu pájky na okrajích pouzdra tedy spíše v rozích pouzder, kde vzniká největší pnutí.

Pouzdro BGA má větší možnost kompenzace termomechanického pnutí z důvodu, že pájecí kuličky mají větší objem, ale i v tomto případě dochází k defektům právě na kuličkách pájky. Z obrázku vpravo lze vidět, že pájecí kuličky ve většině případů praskají u pouzdra a u substrátu. I u pouzder BGA je nejvyšší výskyt prasknutí kuliček pájky právě na okraji pouzder, kde dochází k největšímu pnutí.



Obr. 27: Mikro výbrus pouzder QFN a BGA [37], [38]

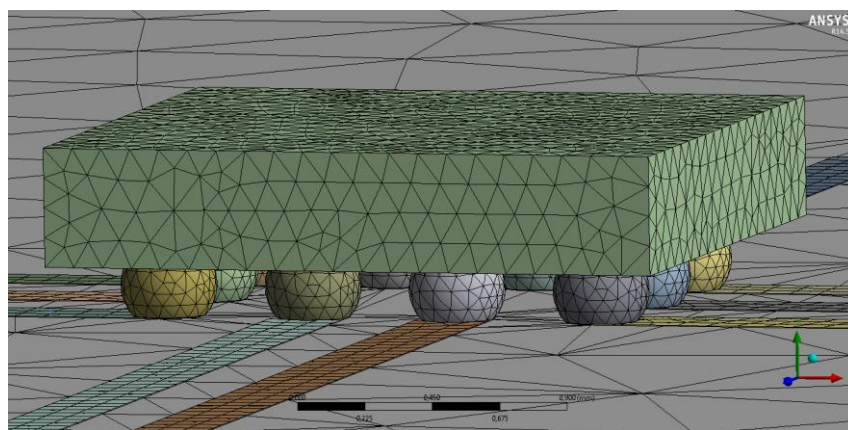
## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část obsahuje simulace v programu ANSYS Workbench a potvrzení těchto simulací pomocí testovací struktury. Bez praktického ověření je simulace spíše jen odhadem či principiální ukázkou chování systému. Vždy je nutné tyto tvrzení ověřit praktickým měřením. V tomto případě měření rozložení teplot pomocí termovizní kamery.

### 4.1 Simulace vlastností pouzder

Pro problematiku teplotních a mechanických simulací je více možností například FloTherm od Mentor Graphics, Altair od HyperWorks a ANSYS od ANSYS Inc. Pro potřeby této práce byl zvolen program ANSYS z důvodu splnění požadovaných předpokladů a především z důvodu platné licence. Programové rozhraní ANSYS nabízí řešení simulací pro celé odvětví techniky. V tomto případě je simulace provedena v části ANSYS Workbench 14.5 a to simulace Steady-State thermal, Transient thermal a Structural.

Program ANSYS pracuje s metodou konečných prvků, kdy je model síťován na prvky s uzly například trojúhelníky (obr. 28). Následně dochází k aproximaci potenciálu na jednotlivých prvcích z uzlových hodnot, které se dosazují do diferenciálních rovnic a sestaví se soustava rovnic řešící námi zadaný problém. Tyto výpočetní metody jsou velmi náročné na výpočetní výkon a čas. Ve většině případů jsou na to určené výpočetní stanice. Některé transientní simulace jsou otázkou desítek hodin i dní výpočetního výkonu.



Obr. 28: Metoda konečných prvků / mesh

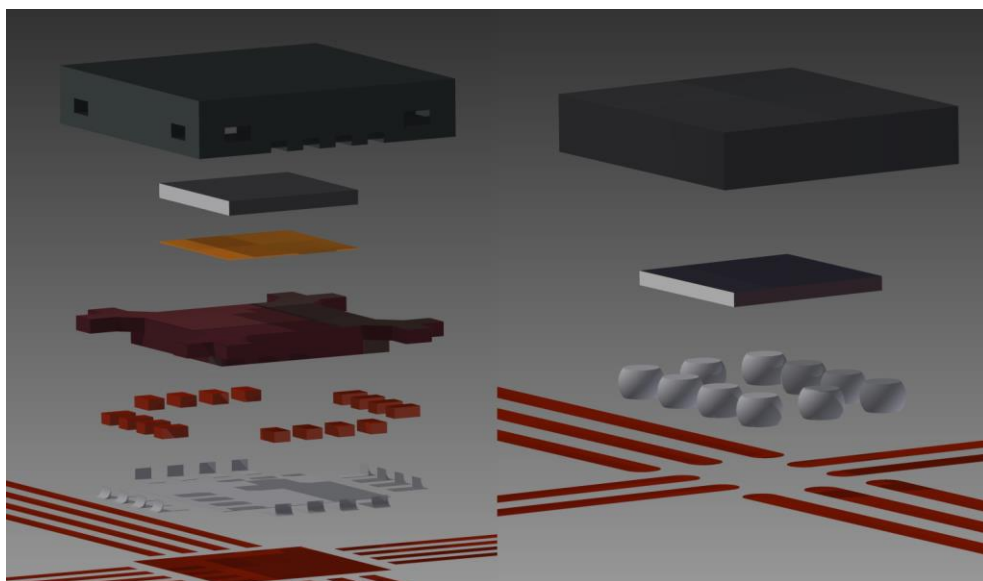
Je důležité upozornit, že doba trvání simulace lze ovlivňovat nastavením tzv. meshe viz obr. 28. Některé části modelu nejsou tak důležité jako například kraje substrátu a není nutné nastavovat tak jemný mesh. Ale na kuličky pájky je nutné



nastavit velmi jemný mesh, protože je tato simulace zaměřená na termomechanické pnutí právě na těchto místech. Většina výše zmíněných nastavení provádí ANSYS automaticky ale ne vždy správně. Uživatel musí sám rozhodnout, které části jsou důležité. Tímto rozhodnutím je možné ušetřit jak výpočetní výkon tak především čas. Zavádění simulací by mělo být nedílnou součástí jakéhokoliv návrhu pouzdra. Při výrobě prototypů může simulace napomoci odhalit problematické části návrhu ještě před jeho realizací, a tím pádem ušetřit finance vynaložené na výrobu prototypů.

## 4.2 Simulace pouzdra QFN a BGA

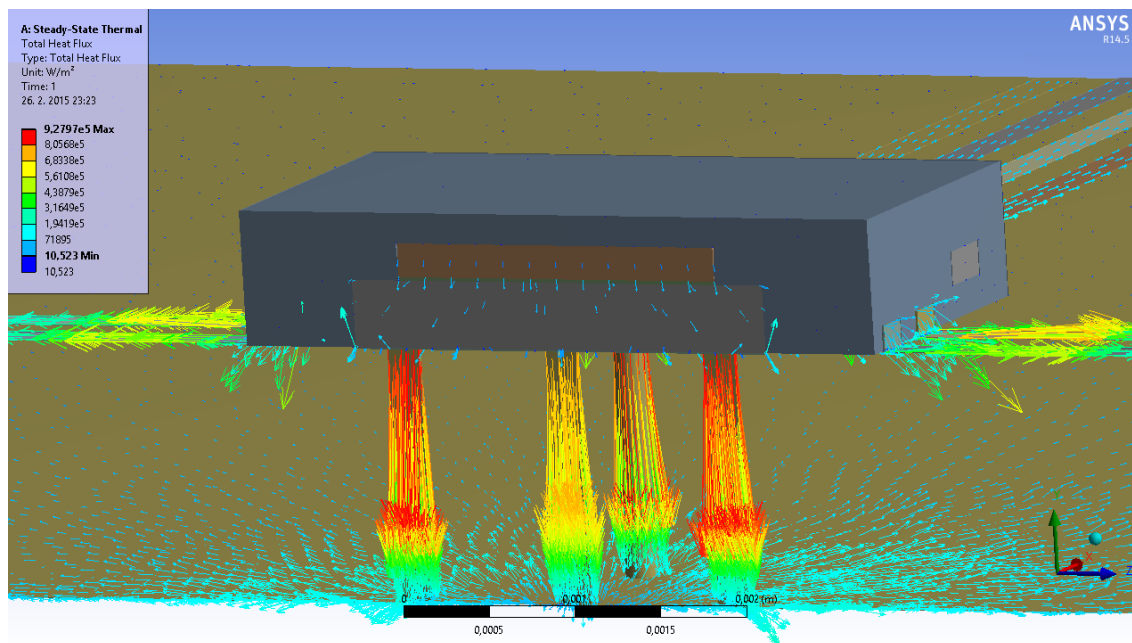
Modely pro pouzdra QFN i BGA byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor 2015 viz (obr. 29). Pouzdro QFN má složitější strukturu, protože struktura byla známá. Oproti tomu pouzdro BGA je velmi zjednodušené z důvodu neznámé vnitřní struktury. Obě pouzdra měla nastavený výkon 250mW. Stejný výkon, při kterém probíhalo experimentální měření. Pro simulaci termomechanického pnutí bylo nastavené zvětšení zobrazení 8x pro snadnější rozpoznání změny.



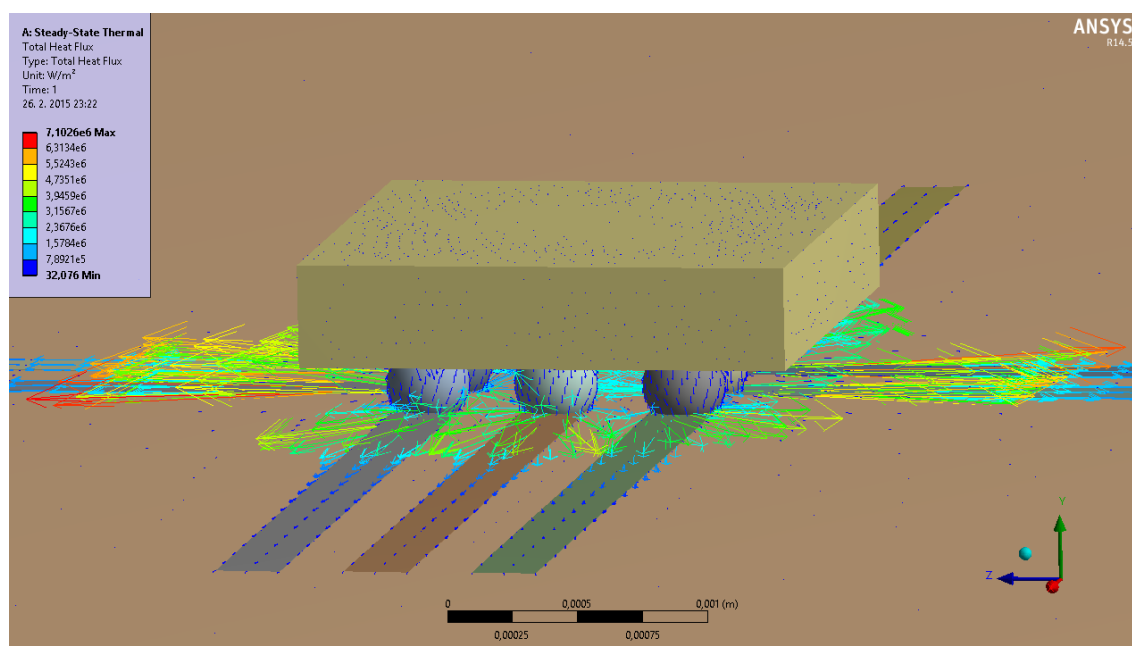
Obr. 29: Modely pouzder QFN a BGA

První simulace byla pro zjištění rozložení teplotního toku na obou pouzdrech. QFN pouzdra mají tzv. thermal pad, tak bylo očekáváno, že většina tepelné energie bude procházet právě touto částí a pokračovat do prokovů a substrátu. Na obr. 30 lze vidět, že se tyto předpoklady potvrdily. Tepelný tok směřuje od čipu přes „thermal pad“ a následně do prokovů a tepelná energie je rozvedena do substrátu.



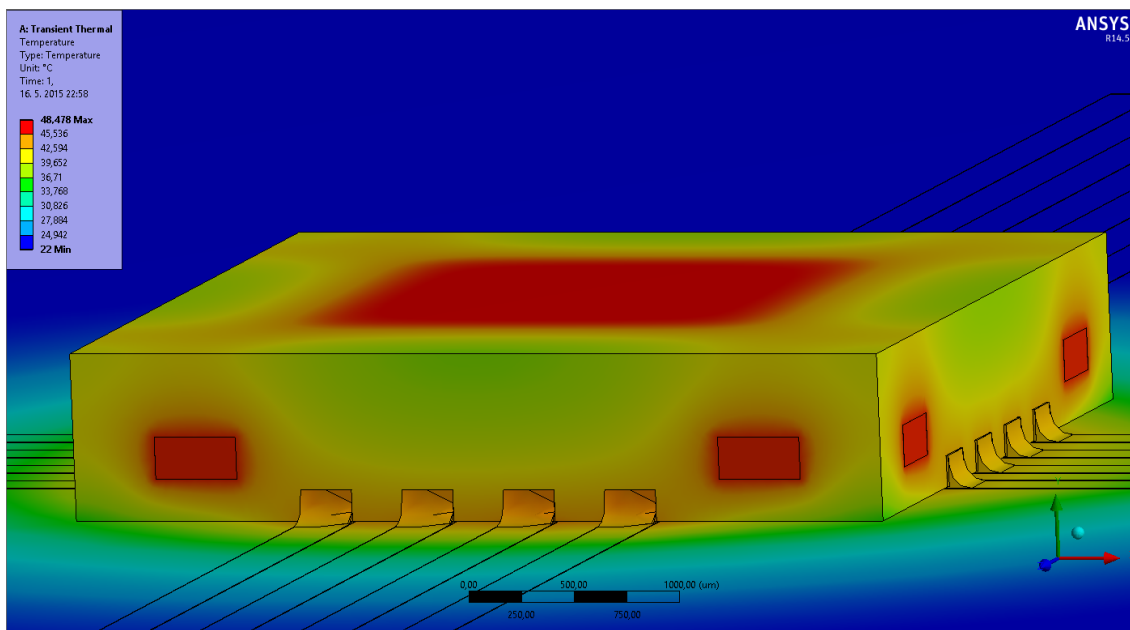


Obr. 30: Tepelný tok v pouzdře QFN

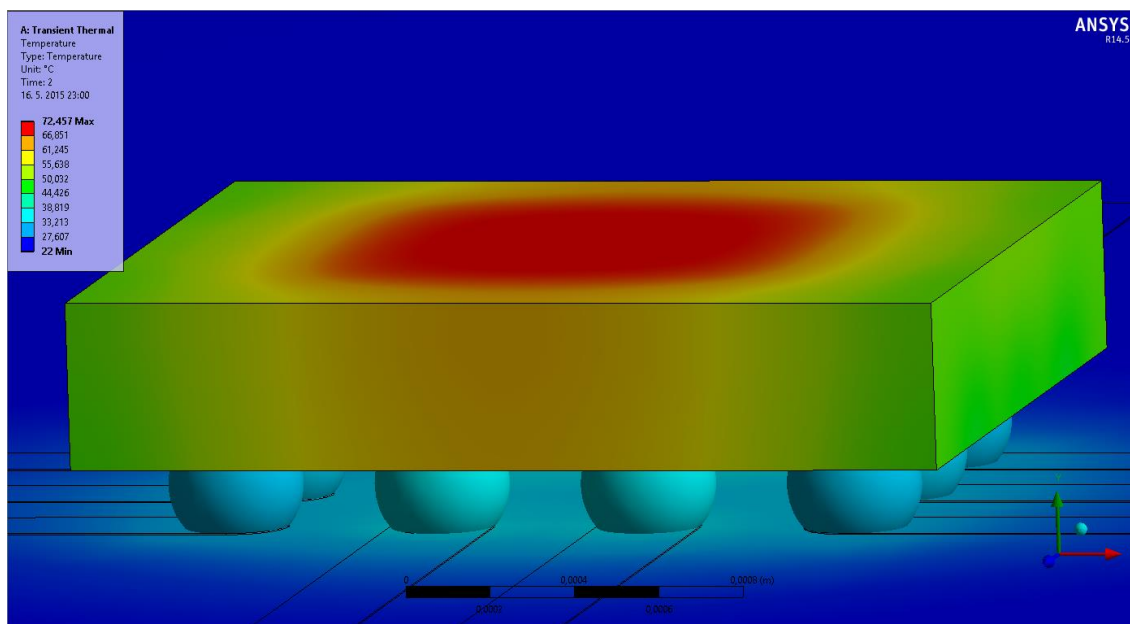


Obr. 31: Tepelný tok v pouzdře BGA

Na obr. 31 lze vidět rozložení teplotního toku na pouzdře BGA. Teplotní tok vede spíše po povrchu pouzdra a do objemu substrátu vede jen malé množství. Tento jev způsobuje akumulaci tepelné energie v pouzdře a jeho zahřívání, protože tepelná energie zůstává v objemu pouzdra. Ochlazení součástky je možné jen teplotou okolí. Při rozměrech 2 x 2 mm to je více než problematické.

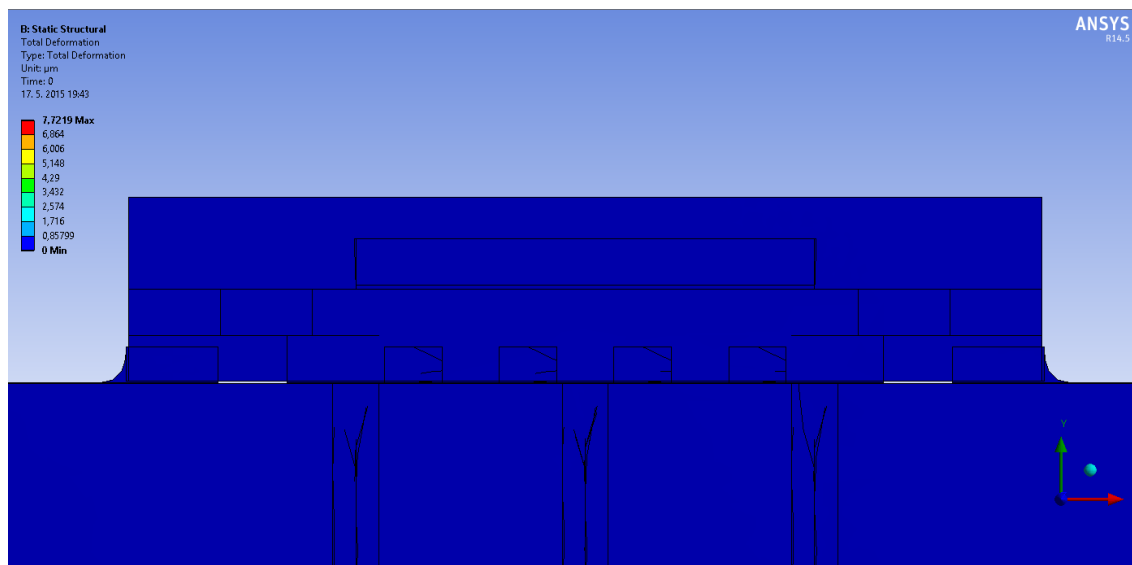


Obr. 32: Rozložení teploty na pouzdře QFN

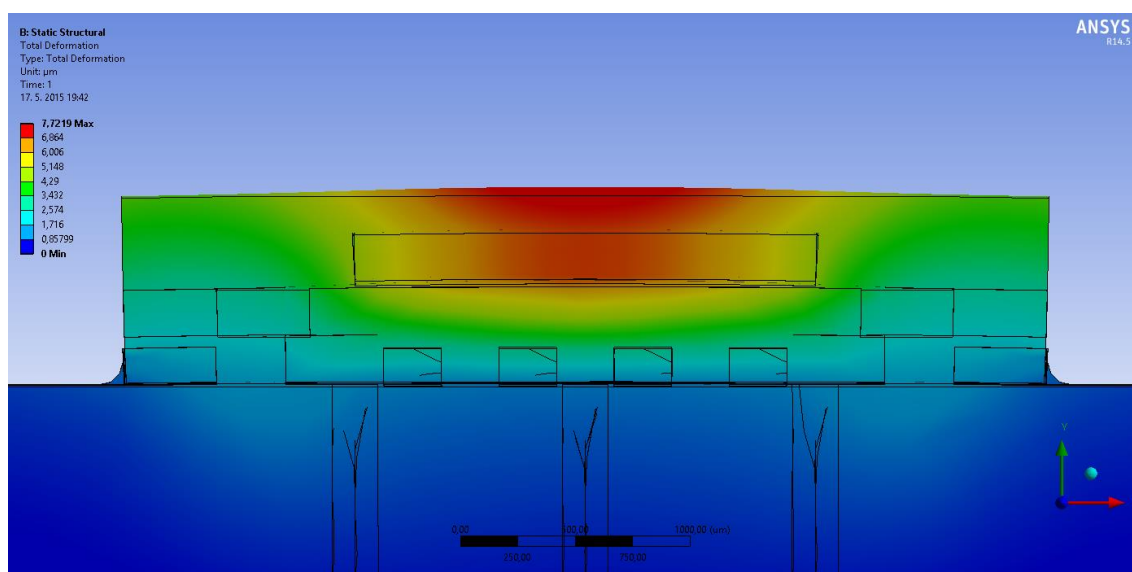


Obr. 33: Rozložení teploty na pouzdře BGA

Na obr. 32 lze vidět rozložení teplot v pouzdře QFN, je patrné, že rozložení teploty na pouzdře kopíruje tvar „thermal padu“ a dochází k rozvedení teploty do substrátu. Maximální teplota dosahovala okolo 48 °C. Přičemž pouzdro BGA (obr. 33) akumulovalo tepelnou energii v objemu pouzdra a nedošlo k velkému přenosu tepla do substrátu. Teplota dosahovala přibližně 72 °C. Z toho vyplývá, že pouzdro QFN je možné výkonově zatížit mnohem více nežli pouzdro BGA. Při větším výkonovém zatížení tohoto pouzdra BGA by bylo vhodné použít underfil.

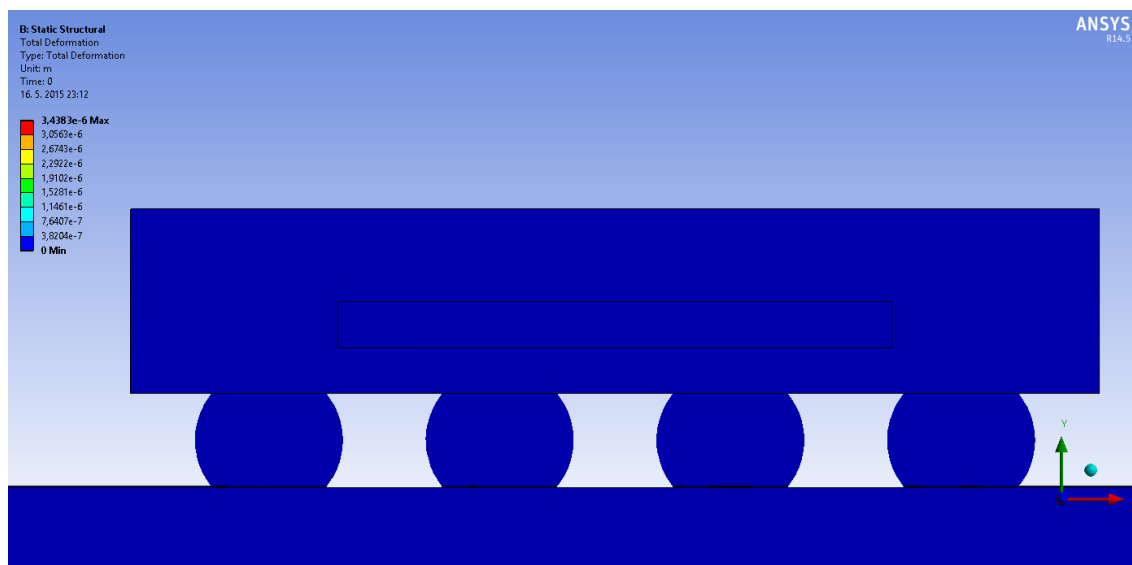


Obr. 34: Zobrazení deformace pouzdra QFN v závislosti na teplotě (22 °C)

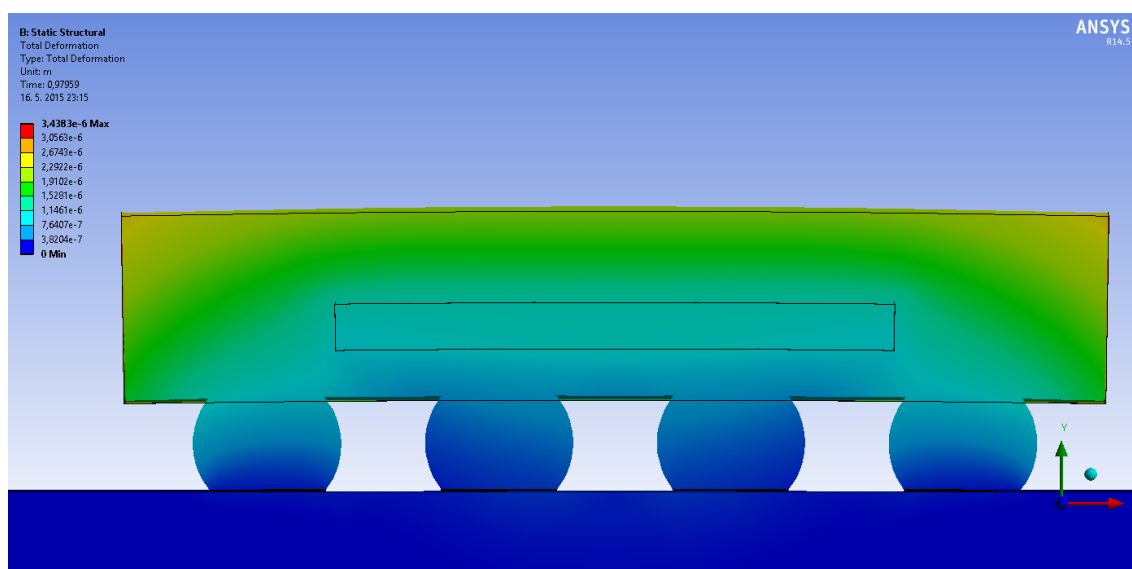


Obr. 35: Zobrazení deformace pouzdra QFN v závislosti na teplotě (48 °C)

Na obr. 34 je zobrazena celková deformace pouzdra QFN při počáteční teplotě v tomto případě 22 °C. Na obr. 27 je zobrazena celková deformace při zvýšené teplotě na 48 °C. Při této teplotě již dochází k deformaci pouzdra. Nejvíce v prostředí, kde je nejvyšší teplota a to je na čipu. Maximální deformace na čipu je přibližně 7µm. Což je k délce čipu 2mm asi 0,35 %. Pnutí v pouzdře se projeví nejvíce na stranách tedy spíše v rozích pouzdra, kde není možné kompenzovat toto pnutí. Jak lze vidět na obr. 35 plošky pouzdra QFN mají tendenci se odtrhnout a také je to nejčastějším defektem způsobeným termomechanickým pnutím.



Obr. 36: Zobrazení deformace pouzdra BGA v závislosti na teplotě (22 °C)



Obr. 37: Zobrazení deformace pouzdra BGA v závislosti na teplotě (72°C)

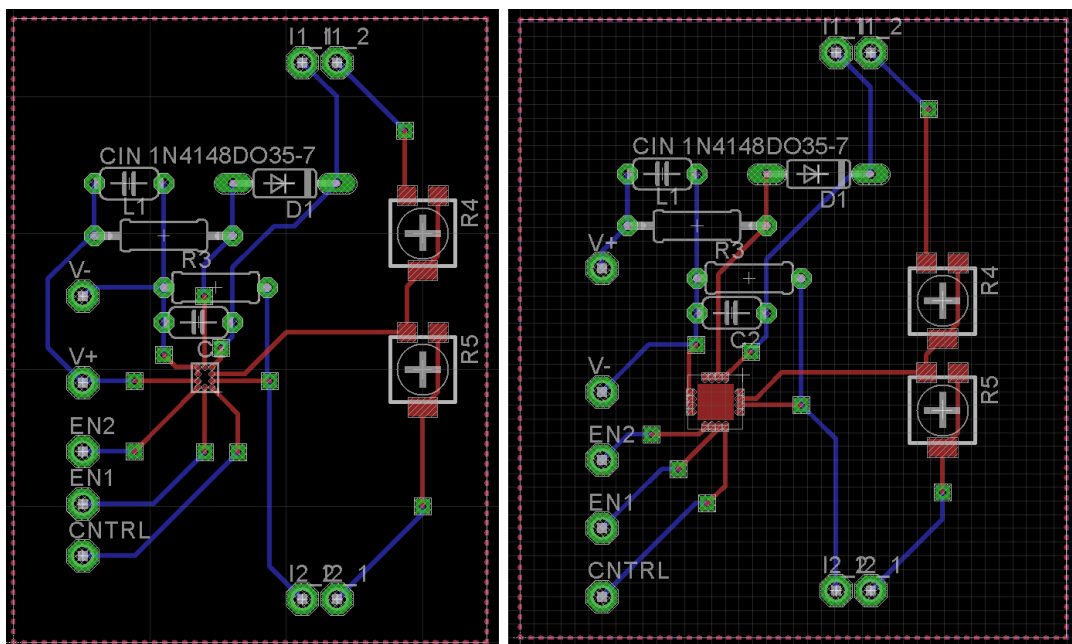
Na obr. 36 lze vidět působení termomechanického pnutí při počáteční teplotě 22°C. Na obr. 37 je zobrazena změna termomechanického pnutí vlivem vysoké teploty. V tomto případě 74 °C. Ze simulace vyplývá, že největší pnutí je v rozích pouzdra. Pnutí ve spodní část je kompenzováno pájecími kuličkami. Právě v tomto místě dochází nejčastěji k defektům u pouzder BGA, kdy je kulička namáhána až dojde k prasknutí a poškození obvodu. Z této simulace vyplývá, že při návrhu by se mělo počítat s tím, že kuličky pájky na okrajích jsou více náchylné k defektům nežli ty, které jsou situovány uprostřed pouzdra.

### 4.3 Návrh testovací struktury

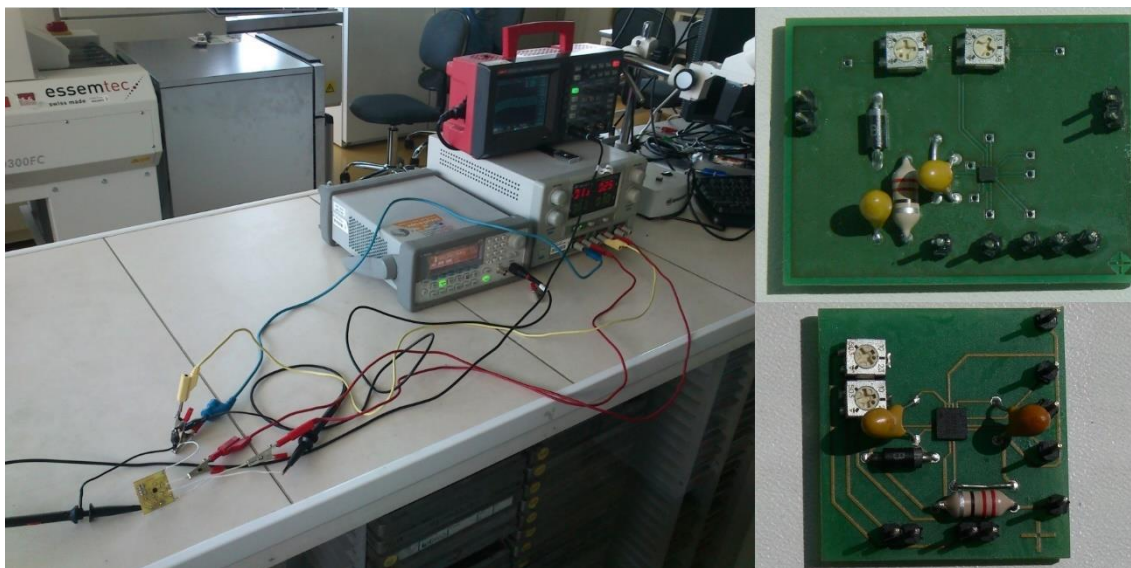
Simulace jsou velmi pomocným nástrojem při návrhu jakéhokoli elektronického systému, ale bez praktického ověření je to spíše principiální nahlédnutí do velmi komplexní problematiky. Z tohoto důvodu byla navržena testovací struktura pro měření termovizní kamerou. Velikost pouzder je 4 x 4 mm a 2 x 2 mm a je velmi obtížné takové malé rozměry snímat. Proto byla zvolena termovizní kamera s makro objektivem se zvětšením 1x.

Funkční zapojení bylo navrženo v programu EAGLE viz obr. 38. Jedná se o součástku LM3503 od firmy TEXAS INSTRUMENTS, která slouží jako řídicí jednotka k led podsvícení pro mobilní telefony. Pro tento případ nebyla potřebná úplná funkčnost, ale schopnost řízeného zatížení pouzder. Místo LED diod byl použit odporový trimr. Součástka byla řízená generátorem na vstupu CNTRL. Napájení součástky zajišťoval vývod V+, V-. Vývody EN1 a EN2 slouží k řízení, která větev je aktivní, tedy jestli je připojen jako zátěž trimr R5 či R4 a nebo jsou zapnuty zároveň. Měření probíhalo vždy v plném zatížení obvodu. Obvod byl zatížen na 250mW, tato hodnota byla použita i pro simulace v programu ANSYS Workbench.

Součástí testování pouzder bylo i zkoumání voidů při pájení QFN pouzdra. V jednom případě zapájení na horké desce a v druhém případě v exsikátoru s atmosférou dusíku v koncentraci 200ppm. Inspekce zapájení pouzdra probíhala pomocí RTG ve firmě SANMINA.



Obr. 38: Zapojení pouzdra BGA a QFN



Obr. 39: Měřicí pracoviště / detail na testovací vzorky BGA a QFN

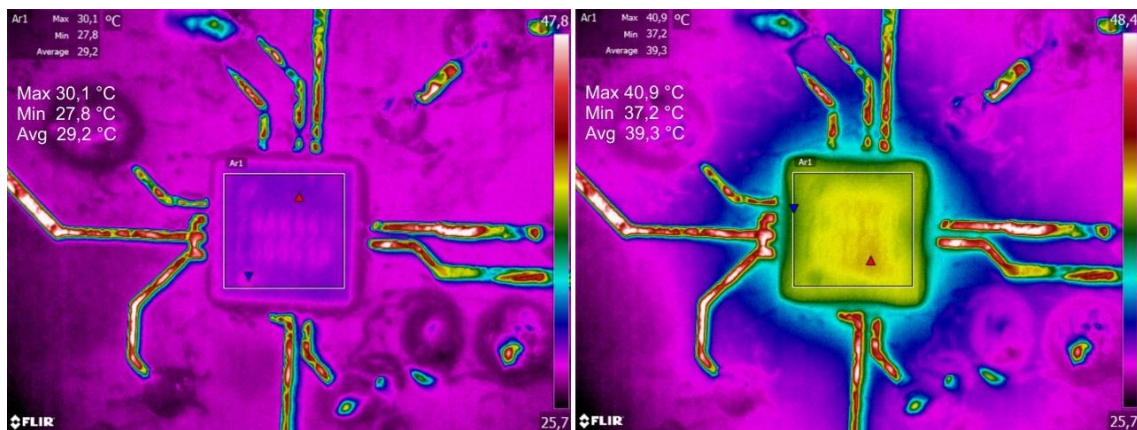
Na obr. 39 lze vidět měřicí pracoviště, kde probíhalo testování funkčnosti a možnosti řízeného zatížení obou obvodů. Pro testování bylo navrženo několik verzí, na obrázku vlevo je první verze desky plošných spojů a vpravo jsou zobrazeny finální verze desek plošných spojů. Následujícím krokem bylo ověření tepelného chování pouzder pomocí termovizní kamery.

Měření termovizní kamerou je obtížné z důvodu rozdílnosti emisivit materiálů. V tomto případě byla nastavena emisivita na povrch pouzdra na hodnotu 0,94. Pro měření termovizní kamerou se používá speciálních sprejů pro nastavení přesné emisivity například ThermaSpray. Spreje se ve většině případů používají na mnohem větší zařízení (elektrické rozvodny), nežli pouzdra o rozměrech 2 x 2 mm a dalo by se předpokládat, že tento nástřik by hodnoty teplot ovlivnil.

#### 4.4 Měření termovizní kamerou

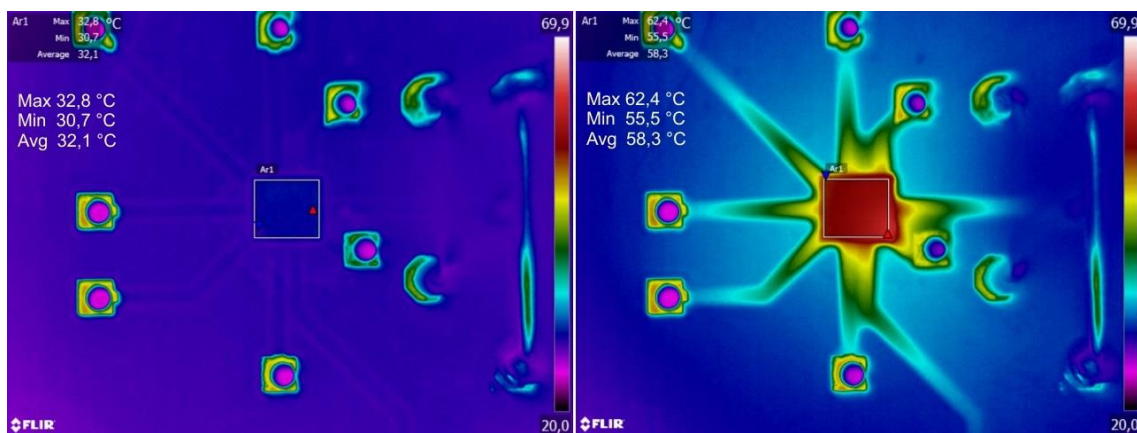
Na obr. 40 je vyobrazeno rozložení teploty na pouzdře QFN v nezatíženém stavu a v stavu zatíženém. Jsou zobrazeny hodnoty teplot a to maximální, minimální a průměrná. Pro měření teploty byla použita funkce čtvercového měření, kdy se měří teplota určité plochy a vyznačí se maximální, minimální a průměrná teplota této plochy. A také zobrazení polohy minimální (modrý trojúhelník) a maximální (červený trojúhelník) teploty. Zahřívání součástky trvalo 60 sekund. Lze vidět, že teplota z pouzdra QFN velmi snadno prostupuje do substrátu a že rozložení teploty kopíruje tvar thermal padu. Maximální hodnota dosahovala 40,9 °C. Je nutné zmínit, že substrát chladl velmi pomalu oproti pouzdru BGA.





Obr. 40: Rozložení teplot na pouzdře QFN (vlevo nezatíženo / vpravo zatíženo)

Na obr. 41 lze vidět rozložení teplot na pouzdře BGA v zatíženém a nezatíženém stavu. Maximální teplota byla na pouzdře po uběhnutí přibližně dvou sekund. Byl to mnohem rychlejší nárůst teploty nežli u pouzdra QFN. Je to z důvodu, že pouzdro BGA akumuluje většinu energie v objemu pouzdra. Z obrázku vyplývá, že určitá část energie proudí skrze měděné cesty, ale substrát není zahříván tak jako u pouzdra QFN. I v tomto případě, je použita funkce na měření teploty pomocí obdélníku vyhradzujícího měřenou plochu. Maximální naměřená hodnota byla 62,4 °C.

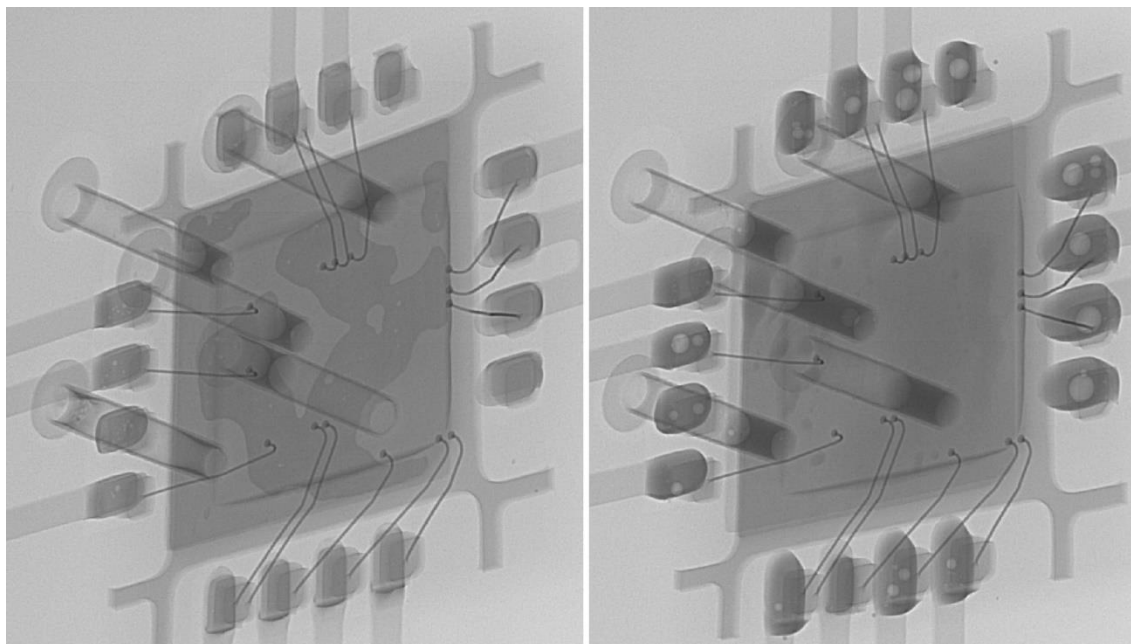


Obr. 41: Rozložení teplot na pouzdře BGA (vlevo nezatíženo / vpravo zatíženo)

Z termovizního snímku lze vidět, že nejvíce tepla je generováno v pravém dolní rohu pouzdra BGA. Lze to usuzovat tomu, že v tomto místě jsou aktivní spínány prvky, které sloužily k zatížení obvodu.

Posledním experimentálním měřením byla problematika pájení „thermal padu“ na pouzdech QFN. A to z toho důvodu, že právě způsob zapájení této plošky je více než rozhodující parametr teplotního chování tohoto pouzdra. Pájení probíhalo na tzv. hot platu tedy horké desce a následně v exsikátoru s dusíkovou atmosférou s koncentrací kyslíku 200ppm. Na obr. 42 lze vidět zřejmý rozdíl mezi těmito dvěma způsoby zapájení. Vlevo je zobrazeno pouzdro zapájené na hot platu. Lze vidět, že nedošlo k dokonalému smáčení a pájka zůstala na určitých místech, kde došlo k přetavení. Součástka vykazovala i mírné nadzvednutí oproti pouzdru přetavené v exsikátoru.

Na obr. 42 vpravo je zobrazeno pouzdro, které bylo přetaveno v dusíkové atmosféře. Je zřejmé, že v tomto případě došlo k dokonalému smáčení pájky. Pájka se smáčela po celé plošce a přebytečná pájka zatekla do prokovů. Oproti přetavení na hot plate je to znatelný rozdíl jak ve smáčení, tak v přetavení. Na pouzdře přetaveném v dusíkové atmosféře jsou zřejmé voidy na pájecích ploškách. Přestože velikost voidů nepřesahuje 25%, tedy podle normy IPC 610E to není defekt, je na pováženu, jakou mírou takto velký void ovlivní spolehlivost pouzdra. Elektrická vodivost je zaručena, ale z pohledu termomechanického pnutí by takovýto void měl být klasifikován jako defekt. V kapitole 2.3 je uvedeno, že pouzdro QFN vydrží nejméně 1000 teplotních cyklů, než dojde k poruše. Je zřejmé, že pokud pájecí ploška obsahuje sebemenší void, klesá spolehlivost z pohledu termomechanického namáhání, protože dojde k defektu dříve.



Obr. 42: RTG inspekce pouzdra QFN hot plate / exsikátor



## 4.5 Vyhodnocení výsledků

Z počítačových simulací byly zjištěny předpoklady pro rozložení teplot a možnou zatížitelnost obvodů a problematické části z pohledu termomechanického pnutí. Byly potvrzeny teoretické předpoklady srovnání pouzder z pohledu teplotního odporu, kdy je zřejmé, že pouzdra QFN mají mnohem nižší teplotní odpor z důvodu existence vodivé plošky na spodní straně pouzdra (thermal pad) a celkového řešení odvodu tepla, nežli pouzdro BGA použité ke srovnání. Z tohoto pohledu bylo zřejmé, že přenos většiny tepelné energie z pouzdra QFN směřoval do substrátu. Pouzdro BGA vykazovalo opačné chování a to, že většina energie se akumulovala v objemu pouzdra a docházelo k přehřívání pouzdra. Tato tvrzení se potvrdila experimentálním pokusem při řízeném zatížení obou obvodů. Měření termovizní kamerou je omezeno jen na povrch, a ověření prostoupení tepla objemem pouzdra není v tomto případě možné.

Výsledné snímky ukázaly, že rozložení teplot není tak rovnoměrné jako při simulacích. Vychází to z rozložení aktivních prvků na čipu. Z termovizních snímků BGA pouzdra lze vidět, že teplotní tok vede měděnými cestami a ohřívá povrch substrátu. Ve výsledku se může měření jevit, že došlo k většímu ohřátí substrátu, ale ve skutečnosti tomu tak není. Z tohoto pohledu ohřívá substrát více pouzdro QFN. Tento poznatek byl zřejmý při měření těchto pouzder, a to z důvodu, že pouzdro BGA ohřálo povrch substrátu velmi rychle v řádech sekund, ale pouzdro QFN ohřívalo substrát pomaleji, z důvodu prostoupení do objemu.

Simulace termomechanického pnutí a celkové deformace ukázaly, že největší pnutí vzniká na kraji pouzder především u pouzder BGA. U pouzder QFN je problematické určit kritické místo z pohledu termomechanického pnutí z důvodu rozmístění plošek jen po obvodu pouzdra. Z toho pohledu se může jevit, že pouzdro QFN z důvodu připájení thermal padu je méně náchylné na toto pnutí. Ve skutečnosti je QFN pouzdro mnohem náchylnější na kompenzaci pnutí a to z důvodu velmi tenké vrstvy pájky. Ověření těchto simulací je již časově náročnější, teplotní cyklování podle normy JEDEC trvá tisíce hodin a v rámci diplomové práce je realizace problematičtější. V rámci citovaných vědeckých článků, lze výsledky této simulace brát jako správné.

Poslední částí byla inspekce pouzdra QFN pomocí RTG. Toto měření bylo zaměřeno na thermal pad, tedy přesněji řečeno na jeho zapájení. Byly použity dva druhy pájení. Na horké desce a v exsikátoru pomocí dusíkové atmosféry s koncentrací kyslíku 200ppm. Výsledkem této inspekce bylo zjištění, že zapájení na horké desce bylo velmi špatné, a také došlo k nadzvednutí součástky. Tento jev je možné přisuzovat povrchové úpravě desky plošných spojů, která byla v tomto případě zvolena jako HAL. Pro takto mále součástky je vhodnější zvolit jinou

úpravu než HAL. Při přetavení nedošlo k dokonalému smáčení a pájka vytvořila shluky pájky a místa, kde vůbec pájka není. Z tohoto pohledu je přetavení v exsikátoru lepší volbou. I přes nevhodně zvolenou povrchovou úpravu se tato metoda jeví jako vhodná. Došlo zde k dokonalému smáčení a přebytek pájky zatekl do prokovů. Tímto spojem bylo vytvořeno dokonalé zapájení thermal padu pro nejmenší tepelný odpor, a tedy pro nejlepší odvod tepla. V tomto případě se objevily v pájce na ploškách tohoto pouzdra viditelné voidy. I když svoji velikostí nepřekračovaly normu, bylo by vhodné upravit proces, aby nedocházelo k těmto voidům. Zde by bylo vhodné zvýšit dobu nad liquidem.

## 5 ZÁVĚR

Tato práce byla především zaměřena na porovnání vlastností pouzder QFN a BGA. Součástí tohoto rozboru byly adhezivní materiály, způsoby nanášení, vytvrzování, testování těchto materiálu a problematika underfilu. V dnešní době je problematika underfilu velmi populární a je to ten správný směr ke zvýšení spolehlivosti pouzder BGA. Tyto kapitoly jsou úzce spojeny s pouzdřením, ale bývají často opomenuty. První kapitola se zabývá popisem současného stavu, kde je rozdělen vývoj pouzder a materiály používané na jejich výrobu. Druhá kapitola se zabývá rozbořem pouzder QFN a BGA a jsou zde porovnány vlastnosti. Následující kapitola je teoretickým rozbořem teplotního chování pouzder, teplotou skelného přechodu a především termomechanického pnutí, nedílnou součástí návrhu elektronického systému.

Následující kapitoly byly zaměřeny na experimenty potvrzující teoretické předpoklady ohledně těchto pouzder. První částí byly simulace v programu ANSYS Workbench. Jednalo se o teplotní a strukturální simulace. Zkoumanou částí bylo teplotní rozložení na obou pouzdrech a možnosti jeho odvádění. Součástí byla i simulace termomechanického pnutí, která se jeví v dnešní době miniaturizace a zvyšování výkonů jako velmi důležitá, z pohledu návrhu elektronických systémů. Simulace může být velmi užitečným nástrojem pro úsporu času a také financí z pohledu prototypů, kdy simulace odhalí velké množství kritických míst, kde je možný vznik defektů.

Nedílnou součástí simulace je ověření její pravdivosti skutečným experimentem, který v tomto případě proběhl. Jednalo se o termovizní měření rozložení teplot na obou pouzdrech při zatížení. Rozložení teplot potvrdilo simulaci a principiálně potvrdilo, kde je součástka nejvíce teplotně zatížena, ale teploty byly rozdílné především pro pouzdro BGA, a to z důvodu neznámé vnitřní konstrukce. Vnitřní struktura pouzdra QFN byla známa a výsledky se více shodovaly. Z práce vychází fakt, že simulační nástroje mohou velmi usnadnit práci při návrhu elektronických systémů, ale je nutné tyto simulace ověřit. Principiální chování jako je rozložení teplot, pnutí a teplotní tok lze považovat za výsledek podle, kterého je možno návrh upravit, ale považovat za použitelné hodnoty teplot ze simulací by mohlo způsobit při návrhu potíže.

# LITERATURA

- [1] INTEL. *Intel® Core™ i7 Processor Family for the LGA-2011 Socket* [online]. 2014 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/datasheets/core-i7-lga-2011-datasheet-vol-1.pdf>
- [2] INTEL. *Moore's Law Inspires Intel Innovation* [online]. 2012 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://www.intel.com/content/www/us/en/silicon-innovations/mores-law-technology.html>
- [3] NORDIC HARDWARE. *Graphene processors on the market in 2022* [online]. 2011 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://www.nordichardware.com/Graphics/graphene-processors-on-the-market-in-2022.html>
- [4] TOPPAN. *Semiconductor Packaging Materials* [online]. 2014 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://www.toppa.co.jp/material/english/semion/package/>
- [5] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Brno: Akademické nakladatelství, VUTUM, 2006. ISBN 8021432926.
- [6] GILLES, Ken. *Packaging materials: Time to consider thermoplastic materials for electronic packaging* [online]. 2005 [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: [http://www.et-trends.com/files/Thermoplastics\\_for\\_Packaging.pdf](http://www.et-trends.com/files/Thermoplastics_for_Packaging.pdf)
- [7] GANČEV, Jan. *Perspektivní materiály pro pouzdrění*. BRNO, 2013. Bakalářská práce. VUT FEKT BRNO. Vedoucí práce doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.
- [8] LOS ADHESIVOS. *Que es un termoestable* [online]. 2015 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.losadhesivos.com/termoestable.html>
- [9] EPOTEK. *Epoxy Adhesive Application Guide* [online]. 2014 [cit. 2015-05-10]. Dostupné z: [http://www.epotek.com/site/files/brochures/pdfs/adhesive\\_application\\_guide.pdf](http://www.epotek.com/site/files/brochures/pdfs/adhesive_application_guide.pdf)
- [10] HUANG, M., C. CHU a F. LIM. *Development of hermetic LCP for electronic device packages*. 2012 IEEE 14th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC) [online]. IEEE, 2012, s. 415-419 [cit. 2014-12-17]. DOI: 10.1109/EPTC.2012.6507119. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6507119>

- [11] DUCHÁČEK, Vratislav. CHEMICKÉ LISTY. *Termoplastické elastomery - Moderní polymerní materiály* [online]. 1997 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: [http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/1997\\_01\\_23-29.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/1997_01_23-29.pdf)
- [12] EPOTEK. *Underfills* [online]. 2013 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: [http://www.epotek.com/site/files/brochures/pdfs/Underfill\\_SAS\\_Sheet.pdf](http://www.epotek.com/site/files/brochures/pdfs/Underfill_SAS_Sheet.pdf)
- [13] EPOTEK. *EPO-TEK® Adhesives Applications* [online]. 2013 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: [http://www.epotek.com/site/files/brochures/pdfs/pcb\\_booklet.pdf](http://www.epotek.com/site/files/brochures/pdfs/pcb_booklet.pdf)
- [14] Differential Scanning Calorimetry (DSC). Instituts für Technische Chemie [online]. 2013 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.itc.tu-bs.de/Abteilungen/Makro/Methods/dsc.htm>
- [15] PARADIGM SHIFT IN APPLYING UNDERFILL. *Asymtek* [online]. 2010 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: [http://www.nordson.com/en-us/divisions/asymtek/Documents/Papers/2005\\_02\\_paradigm\\_shift\\_underfill\\_babiarz\\_panpacific\\_NordsonASYMTEK.pdf](http://www.nordson.com/en-us/divisions/asymtek/Documents/Papers/2005_02_paradigm_shift_underfill_babiarz_panpacific_NordsonASYMTEK.pdf)
- [16] ALPHA ADVANCED MATERIALS. *Recommendations for Assembly of Flip Chips using No-flow Underfill*. [online]. 2013 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://aam.alent.com/products/getpdf.asp?PDF=%5Cproducts%5Cpdfs%5Cpolymer%5CAppBull-NoFlowUnderfillProcessGuidelines.pdf>
- [17] HENKEL. *Loctite® 3536™* [online]. 2007 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: [http://henkel-electronic-solutions.com/files/Produktionika07/Technical\\_Data\\_Sheet\\_Loctite\\_3536.pdf](http://henkel-electronic-solutions.com/files/Produktionika07/Technical_Data_Sheet_Loctite_3536.pdf)
- [18] EPOTEK: *Complete List of Products* [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.epotek.com/site/component/products/products.html?title=&search=0&sign=0&value=>
- [19] FREESCALE SEMICONDUCTOR, Inc. Assembly Guidelines for QFN (Quad Flat No-lead) and DFN (Dual Flat No-lead) Packages [online]. 2014 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: [http://www.freescale.com/files/analog/doc/app\\_note/AN1902.pdf](http://www.freescale.com/files/analog/doc/app_note/AN1902.pdf)
- [20] STATS CHIP PAC. Quad Flat No-Lead Package [online]. 2013 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://www.statschippac.com/~media/Files/Package%20Datasheets/QFN.ashx>

- [21] CYPRESS SEMICONDUCTOR. Transition to Saw QFN [online]. 2008 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://www.cypress.com/?docID=19832>
- [22] DIGI-KEY. EFM32G210F128-QFN32 [online]. 2013 [cit. 2014-11-17]. Dostupné z: <http://media.digikey.com/Renders/Silicon%20Labs%20Renders/32-QFN%20Pkg.jpg>
- [23] TEXAS INSTRUMENTS. QFN/SON PCB Attachment [online]. 2004 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slua271a/slua271a.pdf>
- [24] YI-SHAO LAI. Development and performance characterizations of a QFN/HMT package. 2008 58th Electronic Components and Technology Conference [online]. IEEE, 2008, č. 2, s. 964-967 [cit. 2014-11-17]. DOI: 10.1109/ECTC.2008.4550092. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4550092>
- [25] STATS CHIPPAC. Quad Flat No-Lead Package (Stand-off Terminal) [online]. 2014 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: [http://www.statschippac.com/documentlibrary/qfns\\_st.pdf](http://www.statschippac.com/documentlibrary/qfns_st.pdf)
- [26] DIGIKEY. DigiKey electronics [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/product-detail/en/TMS320F28335ZJZA/296-32770-ND/1907298>
- [27] ELECTRONICS COOLING. The Many Flavors of Ball Grid Array Packages. [online]. 2002 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.electronics-cooling.com/2002/02/the-many-flavors-of-ball-grid-array-packages/>
- [28] ROGREN, Philip. EOPLEX. A High Performance and Cost Effective Molded Array Package Substrate [online]. 2010 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: [http://www.eoplex.com/QFP\\_MR\\_White\\_Paper.pdf](http://www.eoplex.com/QFP_MR_White_Paper.pdf)
- [29] TEXAS INSTRUMENTS. Quad Flatpack No-Lead Logic Packages [online]. 2004 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/scba017d/scba017d.pdf>
- [30] MCLEISH, James. The Transition from MTTF Reliability Predictions to Physics of Failure Reliability Assessments. In: [online]. 2012 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.dfrsolutions.com/wp-content/uploads/2012/03/Transition-from-MTTF-Reliability-redictions-to-POF.pdf>
- [31] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika. 2. přeb. vyd. Editor Petr Dub. Brno: VUTIUM, c2013, 1 sv. (různé stránkování). Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-4123-1.

- [32] ŠVORČÍK, Václav. VŠCHT. Polymery „stručně“ [online]. 2004 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/Polymery.pdf>
- [33] INJECTION MOLDING. Polymers [online]. 2007 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://injectionmoldingonline.com/Molding101/Polymers.aspx>
- [34] SZENDIUCH, Ivan. Základy návrhu elektrických pouzder [online]. 2014 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: [http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/06N%C3%A1vrh%20pouzder\\_Teplotn%C3%AD%20management.pdf](http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/mmte/06N%C3%A1vrh%20pouzder_Teplotn%C3%AD%20management.pdf)
- [35] SEMIWIKI. Thermo Mechanical Fundamentals of IC Package Design and Assembly. [online]. 2012 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <https://www.semiwiki.com/forum/f2/thermo-mechanical-fundamentals-ic-package-design-assembly-1829.html>
- [36] Proceedings of the 21st Student Competiton Conference [online]. 2015 [cit. 2015-05-24]. ISBN 978-80-214-5148-3. Dostupné z: [http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2015/sbornik/EEICT-2015-sbornik-komplet\\_v2.pdf](http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2015/sbornik/EEICT-2015-sbornik-komplet_v2.pdf)
- [37] SLIDESHARE. Manufacturability & reliability challenges with qfn. [online]. 2011 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.slideshare.net/ASQwebinars/manufacturability-reliability-challenges-with-qfn>
- [38] MEGADIGIT. Que es el reballing [online]. 2013 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.megadigit.net/Reballing/>